NRI-ER-992-PNEPN36-00-F

مطالعه فنی و امکان‌سنجی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با تمرکز بر باتری‌ها



مدیر پروژه: محمد گل محمد

مجری پروژه: حمیدرضا لاری

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



DOI: 10.30503/nripress.2020.167

بررسی فنی و پتانسیل‌سنجی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با پاسخ سریع و تعیین هزینه ترازشده ذخیره‌سازی

مدیر پروژه: محمد گل‌محمد

مجری: گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۱

کد گزارش: NRI-ER-992-PNEPN36-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

بررسی فنی و پتانسیل‌سنجی استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با پاسخ سریع و تعیین هزینه تراز شده ذخیره‌سازی/ محمد گل‌محمد. کارفرما: توانیر، ۱۴۰۱.

۱۲۹ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. لاری، حمیدرضا، مجری. ۲. توانیر، کارفرما. ۳. محور اصلی پروژه: ذخیره‌سازی انرژی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب،انتهای‌بلوارشهیددادمان،پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فرم تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب محمد گل‌محمد متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

پیشگفتار

با توجه به اعلام نیاز شرکت محترم توانیر به بررسی انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی با قابلیت پاسخ سریع، پروژه حاضر در قالب فرصت مطالعاتی صنعتی جهت شناسایی انواع سیستم‌ها، بررسی عملکرد فنی و اقتصادی آن‌ها تعریف شد. در این پروژه، ابتدا انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی با پاسخ سریعی مورد بررسی قرار می‌گیرند. شرایط این سیستم‌ها در سایر کشورها و روند توسعه آن مورد بررسی قرار گرفته و سیستم‌های مرجح در کشور معرفی می‌گردند. در ادامه هزینه ذخیره‌سازی انرژی در دو دوره زمانی حاضر و سال ۲۰۳۰ در دنیا و در ایران پیش‌بینی می‌شود. در نهایت استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی سیار برای کاربرد در شبکه برق کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فهرست مطالب

فصل ۱: انواع سیستمهای ذخیره‌سازی انرژی: کاربردها، محدودیتها و مزایا ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- روند مصرف انرژی ۳
۱-۳- خصوصیات اصلی سیستمهای ذخیره‌سازی انرژی ۳
۱-۴- مقایسه فناوریهای ذخیره‌سازی انرژی ۷
۱-۵- سطح بلوغ فناوری ۸
۱-۶- هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی ۱۰
۱-۷- مزایا ۱۱
۱-۸- کاربردهای ذخیره‌سازی ۱۳
1-8-1- کاربردهای ذخیره سازها در شبکهٔ الکتریکی: ۱۴
۱-۸-۲- کاربردهای جدید ۱۵
۱-۹- نتیجه‌گیری: ۱۸
1-10- مراجع: ۲۰
فصل ۲: شناسایی انواع سیستمهای ذخیره‌سازی با پاسخ سریع و روند توسعه فناوریها در سایر کشورها و تعیین سیستم ذخیره‌سازی مرجح در کشور ۲۲
2-1- روشهای ذخیرهٔ انرژی ۲۳
۲-۱-۱- مکانیکی: ۲۳
۲-۱-۲- الکتریکی: ۲۵
۲-۱-۳- الکتروشیمیایی: ۲۶
۲-۱-۴- حرارتی: ۲۷
۲-۱-۵- شیمیایی: ۲۸
۲-۱-۶- ذخیره سازهای حرارتی مبتنی بر سیستمهای تهویه و تبرید ۲۸
۲-۱-۷- هیدورژن (متان؛ متانول): ۳۱
۲-۲- مقایسهٔ بین انواع ذخیره سازهای انرژی: ۳۲
۲-۳- سیستم‌های با قابلیت شارژ سریع ۴۰
۲-۳-۱- ابرخازنهای الکتروشیمیایی: ۴۱
۲-۳-۲- باتریهای فلز-هوا: ۴۱
2-3-3- باتریهای پایه نیکلی: ۴۲
2-3-4- باتریهای پایه سدیمی: ۴۳
2-3-5- باتریهای سیالی: ۴۴
2-3-6- باتریهای سرب-اسید: ۴۵
2-3-7- باتریهای لیتیمی: ۴۶
۲-۳-۸- باتریهای نوین: ۴۷
۲-۳-۹- فلایویل ۴۷
۲-۴- سیستم‌های ذخیره‌سازی در دنیا ۴۸
۲-۵- هزینه‌های فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی ۵۳
۲-۵-۱- توضیحات فناوری ۵۴
۲-۵-۲- -محرک‌های هزینه‌های فناوری ۵۵

۲-۵-۳- - نحوه برآورد هزینه‌های آینده ۵۷
2-5-4- تعامل اقتصاد ذخیره‌سازی با قوانین و سیاست‌های بازار ۵۹
۲-۵-۵- چالش‌ها و مسائل برجسته در اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی ۵۹
۲-۶- نتیجه‌گیری ۶۱
۲-۷- مراجع: ۶۲
فصل ۳: هزینه تراز شده ذخیره‌سازی انرژی فعلی و افق ۲۰۳۰ ..... ۶۴
۳-۱- مقدمه ۶۵
۳-۲- رویکردهای مدل‌سازی برای اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی ۶۶
3-2-1- مدل‌های زمانی ۶۸
۳-۲-۲- مدل‌های اطلاعات کامل ۶۸
۳-۲-۳- مدل‌های اطلاعات ناقص ۷۰
۳-۲-۴- مدل‌های عملیات استراتژیک ۷۱
3-3- تحلیل‌های اقتصادی ذخیره انرژی ۷۲
3-4- آنالیزهای زیست‌محیطی ذخیره انرژی ۷۴
۳-۵- هزینه تراز شده ذخیره‌سازی انرژی (LCOS) ۷۶
۳-۵-۱- مفاهیم اجزای هزینه و معیار عملکرد: ۷۶
3-5-2- محاسبه LCOS ۷۸
۳-۶- نتیجه‌گیری ۹۰
۳-۷- مراجع: ۹۱
فصل ۴: بررسی عملکرد هزینه تراز شده انرژی باتری لیتیومی در مقایسه با دیزل ژنراتور جهت اتصال به شبکه ۹۲
۴-۱- مقدمه ۹۳
۴-۲- هزینه تراز شده انرژی ۹۳
۴-۳- پیک مصرف برق ۱۴۰۱ ..... ۹۷
۴-۴- نتیجه‌گیری ۱۰۱
۴-۵- مراجع: ۱۰۲
فصل ۵: بررسی کاربرد ذخیره‌سازی سیار در شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ و پیک‌سایی در شبکه فوق توزیع ۱۰۳
۵-۱- مقدمه ۱۰۴
۵-۲- کاربرد ذخیرهسازی سیار در شبکه برق ۱۰۴
۵-۳- ذخیره‌سازی انرژی سیار برای افزایش تاب‌آوری ۱۰۶
۵-۴- منابع انرژی سیار برای افزایش تاب‌آوری ۱۰۸
۵-۵- محدودیتهای عملیاتی شبکه ۱۱۰
۵-۶- سیستم انتقال ۱۱۱
5-7- بهبود پروفیل ولتاژ و پیکسایی در شبکه فوق توزیع ۱۱۳
۵-۸- نتیجه‌گیری ۱۱۶
۵-۱- مراجع ۱۱۷

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱- تقسیم‌بندی سیستمهای ذخیره‌سازی انرژی بر اساس نرخ توان برای کاربردهای مختلف ۵
شکل ۱-۲- طبقه‌بندی فناوریهای ذخیره‌سازی انرژی ۶
شکل ۱-۳- فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی بر حسب خروجی توان و انرژی ۷
شکل ۱-۴- میزان ریسک و سرمایه‌گذاری فناوری برای هر فناوری بر اساس بلوغ..... ۹
شکل ۱-۵- سطح تجاری‌سازی فناوری برای مقیاس‌های مختلف ۱۰
شکل ۱-۶- زمان دشارژ فناوری بر اساس اندازه سیستم.....۱۳
شکل ۲-۱- تعداد پروژه های ثبت شده در دنیا در بحث ذخیره سازهای انرژی الکتریکی ۳۳
شکل ۲-۲- سهم هر نوع فناوری باتری در بین ذخیره سازهای الکتروشیمیایی ۳۴
شکل ۲-۳- درصد سهم ذخیره سازهای انرژی در تولید توان در دنیا ۳۵
شکل ۲-۴- میانگین تولید توان برحسب سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی (MW) ۳۶
شکل ۲-۵- نسبت سیستمهای ذخیره‌سازی بجز PHES.....۵۳
شکل ۲-۶- سهم سیستمهای ذخیره‌سازی نصب شده از سال ۲۰۲۰ .....۵۳
شکل ۳-۱- هزینه‌های کنونی باتری بر اساس مطالعات ۲۰۱۹ و بعد ۶۵
شکل ۵-۱- شماتیک بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع با استفاده از سیستمهای ذخیرهسازی انرژی سیار ۱۰۷
شکل ۵-۲- مقایسه تاثیر کاربرد ذخیرهساز باتری بر ولتاژ شبکه ۱۱۴

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱- خصوصیات اصلی سیستمهای ذخیرهسازی انرژی بر طبق انواع کاربردها ۴
جدول ۱-۲- پارامترهای هزینهای، بازدهی و عمر فناوریهای ذخیرهسازی انرژی ۱۱
جدول ۲-۱- مشخصات انواع سیستمهای ذخیره‌سازی ۳۷
جدول ۲-۲- ظرفیت ذخیرهسازی باتری لیتیومی در دنیا ۴۸
جدول ۲-۳- ظرفیت ذخیرهسازی باتری سدیم سولفور در دنیا ۵۰
جدول ۲-۴- ظرفیت ذخیرهسازی باتری جریانی در دنیا ۵۰
جدول ۳-۱- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت ۷۹
جدول ۳-۲- هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت ۸۰
جدول ۳-۳- هزینه باتری سرب اسید با زمان تخلیه ۴ ساعت ۸۱
جدول ۳-۴- هزینه باتری جریانی وانادیومی با زمان تخلیه ۴ ساعت ۸۲
جدول ۳-۵- هزینه باتری جریانی آهنی با زمان تخلیه ۴ ساعت ۸۳
جدول ۳-۶- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول تولید ایران ۸۴
جدول ۳-۷- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول خارجی پکینگ در ایران ۸۵
جدول ۳-۸- هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول تولید ایران ۸۶
جدول ۳-۹- هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول خارجی پکینگ در ایران ۸۷
جدول ۳-۱۰- هزینه باتری سرب-اسیدی با زمان تخلیه ۴ ساعت تولیدی ایران ۸۸
جدول ۴-۱- مقدار انتشار گاز CO_2 برای فناوریهای مختلف ۹۶
جدول ۴-۲- هزینه تزار شده برای سیستمهای مختلف بدون و با هزینه انتشار گاز ۹۶
جدول ۴-۳- پیک مصرف برق و ذخیره نیروگاهی در خرداد لغایت شهریور ۱۴۰۱ ..... ۹۷
جدول ۵-۱. تحقیقات انجام شده بر افزایش تاب‌آوری و اهداف مدنظر ۱۰۸
جدول ۵-۲. اثر کاربرد ذخیره‌ساز باتری بر ولتاژ شبکه ۱۱۴
جدول ۵-۳- تاثیر استفاده از ذخیره‌ساز بر روی توان اکتیو، راکتیو و تلفات شبکه ۱۱۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فصل ۱: انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی: کاربردها، محدودیت‌ها و مزایا

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۱-۱- مقدمه

یکی از بزرگترین چالش‌های قرن بیست و یکم، همراه شدن با رشد جهانی نیاز و مطالبه انرژی در نتیجه افزایش جمعیت و بالا رفتن استانداردهای زندگی است. مطابق با پیش‌بینی‌های صورت پذیرفته، مجموع تقاضای انرژی در کره زمین در میانه قرن ۲۱ به دو برابر مقدار فعلی و در انتهای قرن حاضر به سه برابر مقدار فعلی می‌رسد. انرژی‌های فسیلی به دلیل محدودیت‌های ذاتی و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی جوابگوی نیاز انرژی جهان نخواهند بود. روش‌های تامین انرژی مازاد مورد نیاز، باید پاک و امن باشند به طوریکه از افزایش روند گرمایش جهانی و آلودگی هوا جلوگیری شود. بشر به مرور آگاه‌تر شده است که گسترش انرژی‌های تجدیدپذیر برای جهت‌دادن به تغییر آب و هوا، ایجاد فرصت‌های تازه اقتصادی و ایجاد انعطاف‌پذیری بیشتر در سیستم‌های انرژی موجود، حیاتی است. در واقع چالش عمده بشر در قرن ۲۱، گذر از انرژی‌های پایه سوختی به انرژی‌های تجدیدپذیر است. بنابراین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر معرفی شدند از جمله انرژی خورشیدی، بادی، زیست توده، زمین گرمایی، امواج، پیل سوختی و غیره مطرح شده است. در بین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی و بادی از اهیمت ویژه‌ای برخوردا هستند و پتانسیل بالاتری برای تامین انرژی آینده بشر دارند. یکی از مشکلاتاصلی انرژی‌های تجدیدپذیر عدم دسترسی پایدار به آن است. برای مثال انرژی خورشیدی در شب در دسترس نیست و انرژی بادی در زمان‌هایی که میزان جریان باد کم است برای تامین برق کافی نیست. بنابراین سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی جهت پاسخگویی به این چالش مطرح هستند. با توجه به رشد نیاز روزافزون به ذخیره‌سازی انرژی در بخش‌های مختلف، با توجه به فناوری‌ها و مواد جدید برای کاربردهای مختلف، انواع راه‌حل‌های مطرح شده است. از گذشته استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی جهت ذخیره برق در زمان خارج از پیک و تحویل انرژی در زمان پیک مورد استفاده بوده است تا عدم توازن بین تولید و مصرف برق در زمان‌های مختلف را مرتفع سازد. البته با توجه به شرایط جغرافیایی، اقتصادی و همچنین توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر (از جمله بادی و خورشیدی) متنوع‌تر شده است. از سوی دیگر برای پایداری و امنیت شبکه، یکی از فاکتورهای مهم سیستم پاسخ فرکانسی اولیه (PFR) است. بنابراین رنجی از راه‌حل‌ها مورد نیاز است. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند به صورت سیستم‌های پاسخ سریع برای مدیریت تولید و مصرف لحظه‌ای شبکه و یا روزانه باشد و از سوی دیگر ممکن است این پاسخ بلندمدت تر باشد برای تغییرات غیرقابل پیش‌بینی هفتگی و یا قابل پیش‌بینی فصلی[۱-۳]. انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی به صورت کلی عبارتند از:

- باتری‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی
- حرارتی
- مکانیکی

- تلمبه ذخیره‌ای
- هیدروژن

در بین این گزینه‌ها سیستم‌های باتری (سرب‌اسید، لیتیومی، جریانی، سدیم سولفور)، ابرخازن‌های توان و انرژی بالا، فلایویل توان بالا، ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی با ابررساناها و ذخیره‌سازی انرژی برودتی قابلیت استفاده برای کاربردهای پاسخ سریع (لحظه‌ای و/یا روزانه) را دارند [۲-۴]. هدف اصلی در این پروژه بررسی انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پاسخ سریع و تعیین گزینه‌های مناسب برای استفاده در شبکه برق کشور می‌باشد.

۱-۲- روند مصرف انرژی

مصرف انرژی بعد از انقلاب صنعتی به دلایلی از جمله رشد جمعیت، اختراع روش‌ها و ماشین‌های جدید، توسعه اقتصادی و ... به شدت در حال افزایش است. بر طبق آمار، مصرف انرژی در هر دهه دو برابر می‌شود. همچنین، تولید انرژی به شدت افزایش پیدا کرده است خصوصا انرژی الکتریکی. علاوه بر این محرک‌ها فروش الکتریسیته ارزانتر از قیمت واقعی در برخی کشورها خصوصا در کشورهای حاشیه خلیج فارس است که باعث شده کمتر به مقوله کاهش مصرف و بهینه‌سازی مصرف توجه شود. به هر ترتیب تولید در آینده‌ای نزدیک نمی‌تواند پاسخگوی نیاز انرژی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه باشد. بنا بر آمار مصرف انرژی دنیا در سال ۲۰۱۵ ۱۴۶۰۰۰ تراوات ساعت بوده که ۲۵ برابر بیشتر از سال ۱۸۰۰ است. بنابراین استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در سال‌های اخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. در ادامه به بررسی خصوصیات سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پرداخته و در ادامه به کاربرد سیستم‌ها و انواع آن پرداخته خواهد شد.

۱-۳- خصوصیات اصلی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

برخی از عملکردهای معمول در فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی در ادامه ارائه شده است[۵].

ظرفیت توان به عنوان مقدار توان قابل تولید (kW یا MW) در شرایط خروجی حداکثری

ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مقدار انرژی الکتریکی بر حسب kW یا MW که یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند یک دوره ذخیره کند

- بازدهی عبارتست از نسبت الکتریسیته قابل بازیابی بر مقدار الکتریسیته ورودی در حین شارژ
- زمان پاسخ عبارتست از مدت زمان مورد نیاز برای آزاد کردن کل توان سیستم
- عمق دشارژ (DOD) حاکی از مقدار توانی است که می‌تواند در حین یک سیکل دشارژ شود.
- دانسیته انرژی / توان ویژه عبارتست از انرژی / توان موجود بر حسب واحد حجم J/L یا W/L

طول عمر سیستم انرژی ذخیره‌سازی عبارتست از زمان تخریب سیستم انرژی ذخیره‌سازی که می‌تواند به عنوان عمر تقویمی یا عمر سیکلی اندازه‌گیری می‌شود. تعداد سال‌هایی که پیش‌بینی می‌شود سیستم عمر کند به عنوان عمر تقویمی ودر حالیکه عمر سیکلی عبارتست از تعداد سیکل شارژ دشارژ که سیستم قبل از از بین رفتن می‌تواند تامین کند. طول عمر سیستم انرژی ذخیره‌سازی با نوع سیستم، محیط اطراف، DoD و سایر پارامترهای عملکردی تاثیر می‌پذیرد.

فرمول ریاضی که معمولا برای عمکلرد کلی سیستنم ذخیره‌سازی استفاده می‌شود عبارست از:

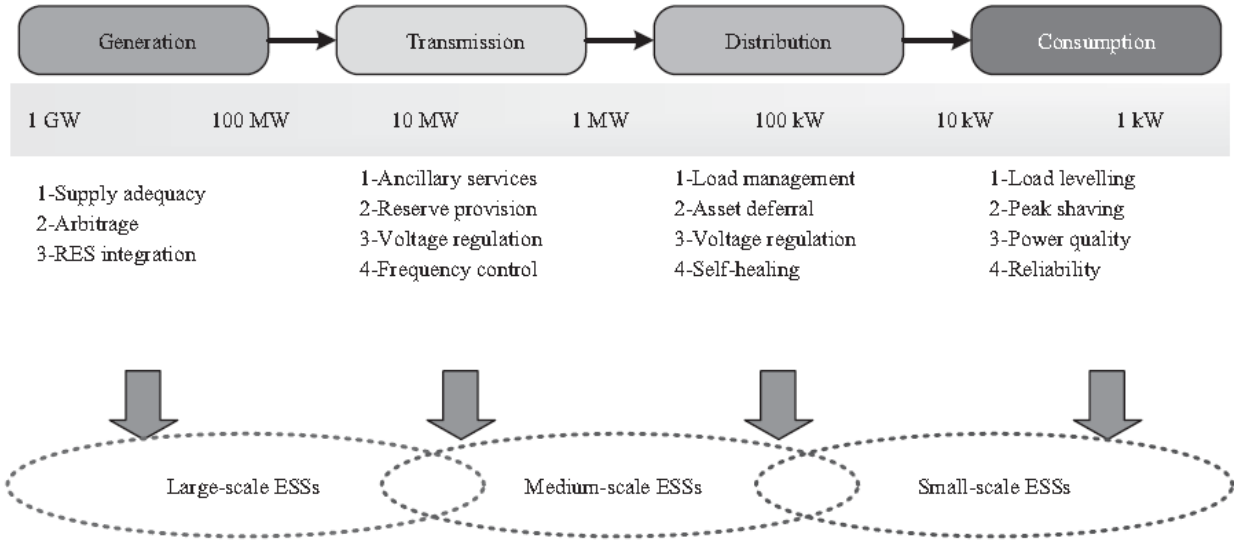
$$E(t) - E(t-1) + \eta_{charge}.P_{charge}(t).\Delta t - \frac{1}{\eta_{discharge}}.P_{discharge}(t).\Delta t$$

خصوصیات اصلی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در جدول زیر به صورت خلاصه ارائه شده است. همچنین در شکل بعدی کاربرد انواع ESSها با سطوح ولتاژ مختلف بر طبق نرخ توان به صورت شماتیک ارائه شده است [۱ و ۶].

جدول ۱-۱- خصوصیات اصلی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر طبق انواع کاربردها

زمان پاسخ	چرخه کارکرد	مدت زمان تخلیه	ظرفیت توان (MW)	خروجی ESS	کاربرد
کمتر از ۱۵ دقیقه	۱ تا ۲۹ دقیقه در روز	۱۵ دقیقه تا ۱ روز	۱ تا ۲۰۰۰	الکتریسیته، حرارت	تعقیب بار
۱ دقیقه	۲۰ تا ۴۰ بار در روز	۱ تا ۱۵ دقیقه	۱ تا ۲۰۰۰	الکتریسیته،	کنترل فرکانس
بیش از ۱ ساعت	۰,۲۵ تا ۱ بار در روز	۸ تا ۲۴ ساعت	۱۰۰ تا ۲۰۰۰	الکتریسیته،	آربیتراژ
میلی ثانیه تا ثانیه	۱۰ تا ۱۰۰ بار در روز	۱ ثانیه تا ۱ دقیقه	۱ تا ۴	الکتریسیته،	پشتیبانی ولتاژ
بیش از ۱ ساعت	۰,۱۴ تا ۱,۲۵ بار در روز	۲ تا ۴ ساعت	۱۰ تا ۵۰۰	الکتریسیته، حرارت	مدیریت گرفتگی شبکه

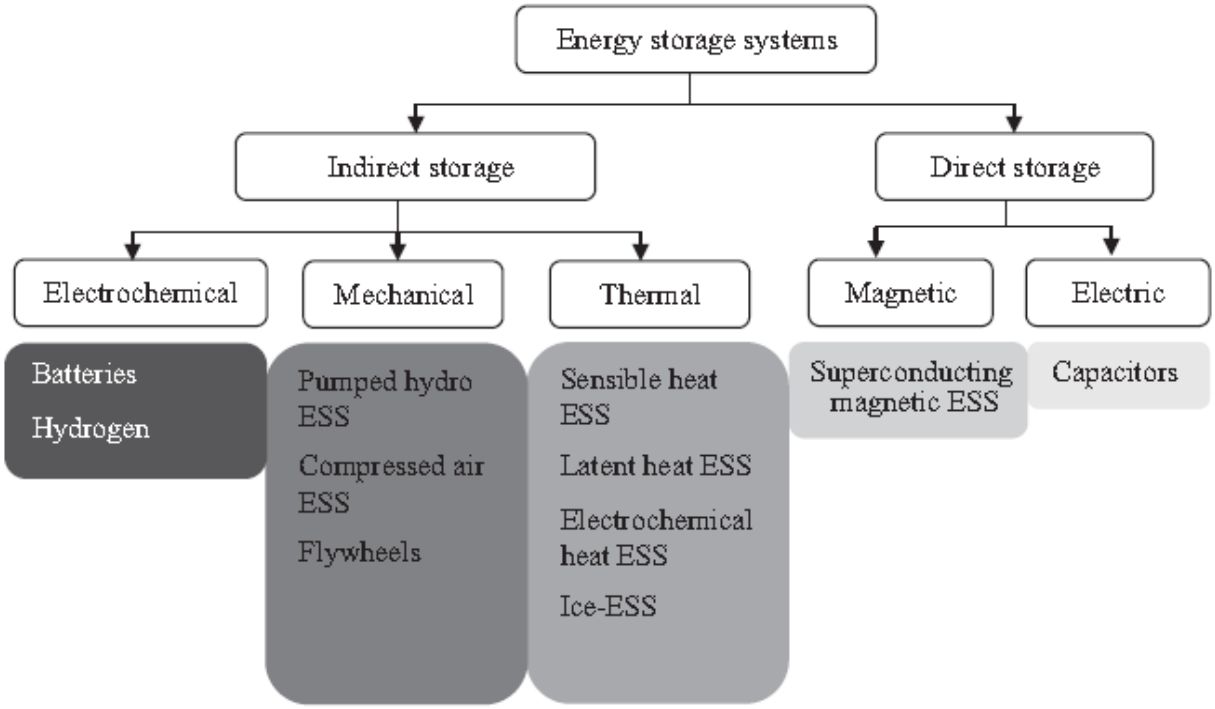
بیش از ۱ ساعت	۰,۷۵ تا ۱,۲۵ بار در روز	۲ تا ۵ ساعت	۱ تا ۵۰۰	الکتریسیته، حرارت	تعویق در توسعه
کمتر از ۱۵ دقیقه	۱ تا ۲۹ بار در روز	دقیقه تا چند ساعت	۰,۰۰۱ تا ۱	الکتریسیته، حرارت	تسطیح بار
کمتر از ۱۵ دقیقه	۰,۵ تا ۲ بار در روز	یک دقیقه تا چند ساعت	۱ تا ۴۰۰	الکتریسیته، حرارت	ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر
کمتر از ۱۵ دقیقه	۰,۵ تا ۲ بار در روز	۱۵ دقیقه تا ۲ ساعت	۱۰ تا ۲۰۰۰	الکتریسیته،	ذخیره‌های عملیاتی



شکل ۱-۱- تقسیم‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی بر اساس نرخ توان برای کاربردهای مختلف[۶]

برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، در ابتدا این الکتریسته، یا سایر اشکال انرژی از جمله حرارتی، شیمیایی، الکتریکی و مکانیکی باید به جریان مستقیم تبدیل شود. وقتی نیاز به انرژی ذخیره شده بوجود آمد، جریان باید مجددا به انرژی الکتریکی جریان مستقیم تبدیل شود. از منظر فنی، ESS ها دارای فناوری‌های مختلفی هستند، با این حال، باید به صورت روزانه بروزرسانی شوند که در ادامه فناوری‌های مختلف با توجه به سطح ولتاژ در شکل زیر مشخص شده است.

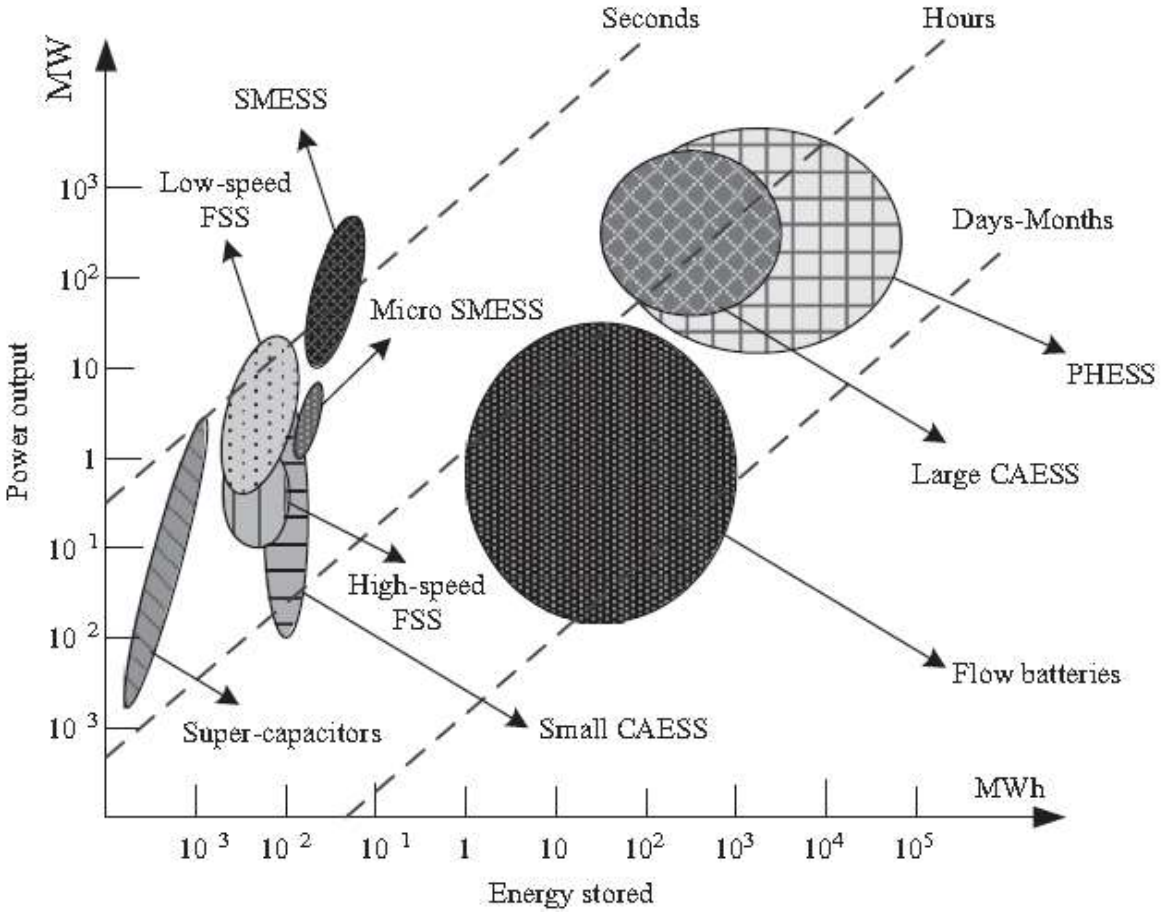
DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۱-۲- طبقه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی[۷]

در طبقه‌بندی بالا سیستم‌های ذخیره‌سازی تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده هر دو دارای توان بالا (بالاتر از ۵۰ مگاوات) و ظرفیت ذخیره انرژی بزرگتر از ۱۰۰ مگاوات ساعت هستند. باتری‌ها در محدوده توان ۱ تا ۵۰ مگاوات و ظرفیت انرژی ۵ تا ۱۰۰ مگاوات ساعت قرار می‌گیرند و به عنوان سیستم‌های ذخیره‌سازی با توان و ظرفیت متوسط شناخته می‌شوند. ذخیره‌سازی هیدروژن و حرارتی دارای توان و ظرفیت پایین هستند. فلایویل و مغناطیس ابررسانا (SME) و خازن‌ها دارای توان یا ظرفیت بالا هستند ولی نه توامان. مشخص است که فناوری‌های در مقیاس بالا دارای کاربرد در نیروگاه‌ها هستند در حالیکه سیستم‌های کوچک یا متوسط برای ارتباطات از راه‌دور و ماهواره‌ای و خودروهای برقی و مناسب هستند/ کاربرد این فناوری‌ها باید با شبکه‌ای که قرار است استفاده شود و نوع تولید مطابقت داشته باشد[۷-۹] . شکل زیر ارتباط بین توان و ظرفیت انرژی انواع ESSها را نشان می‌دهد[۱۰].

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۱-۳- فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی بر حسب خروجی توان و انرژی [۱۰]

۱-۴- مقایسه فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی

در این بخش انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی از منظر اقتصادی-فنی مورد مقایسه قرار می‌گیرند. لازم بذکر است که سیستم ذخیره‌سازی انرژی به عنوان سیستم ایده‌آل وجود ندارد که بتواند همه نیازهای کاربردهای سیستم توان را جوابگو باشد. یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی ایده‌آل دارای ظرفیت و دانسیته انرژی بالا، بازدهی بالا، قیمت پایین و طول عمر بالاست. البته تا به امروز هیچ‌یک از این سیستم‌های ذخیره‌سازی دارای تمامی این شرایط به صورت همزمان نیستند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌توانند در تمامی بخش‌های زیرساخت سیستم توان از تولید تا مصرف مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین برای استفاده از یک سیستم مناسب، اپراتورهای سیستم برق باید جزئیات اصلی از جمله پایداری، امنیت، اقتصادی، محیط زیستی، سایز و مکان بهینه، سطح ولتاژ سیستم و زمان پاسخگویی سیستم مورد توجه قرار گیرد. در جاییکه نیاز به ظرفیت

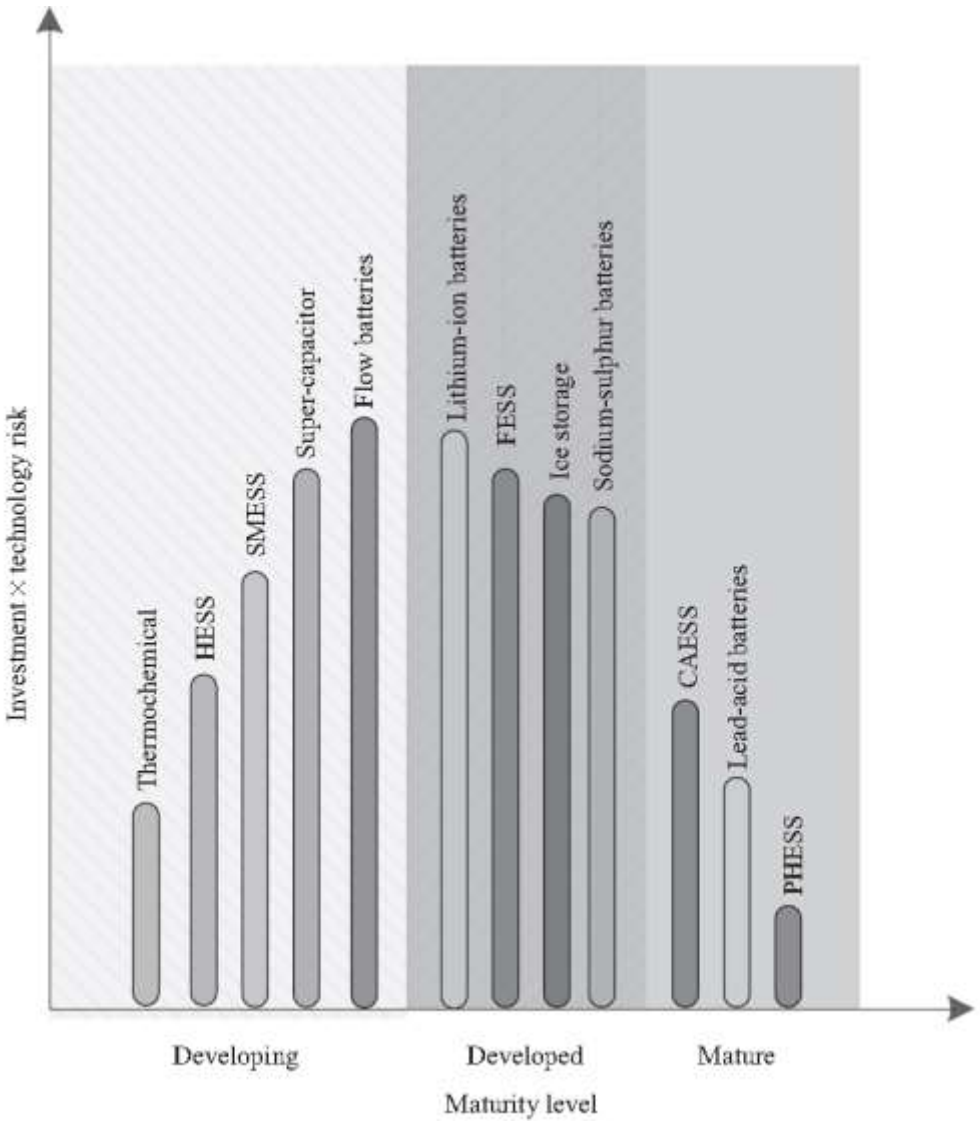
DOI: 10.30503/nripress.2020.167

بالاست، فناوری‌های ذخیره‌سازی تلمبه برق–آبی، CAES و حرارتی مورد توجه هستند در صورتیکه برای سیستم‌های ولتاژ پایین و خصوصا میکرو شبکه‌های جزیره‌ای باتری و ذخیره‌سازی یخ بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. برای مثال ذخیره‌سازی تلمبه برق–آبی و حرارتی برای کاربردهای در محل تولید مناسب است. در بخش انتقال و توزیع، باتری و فلایویل کاندیداهای مناسبی هستند. در بخش مصرف، باتری، ذخیره‌سازی حرارتی و برخی فناوری‌های ذخیره‌سازی حرارتی مورد توجه است [۱۱–۱۳].

۱–۵– سطح بلوغ فناوری

در شکل زیر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی از منظر بلوغ فناوری با توجه به شاخص‌های الزامات سرمایه‌ای و ریسک فناوری نشان داده شده است .

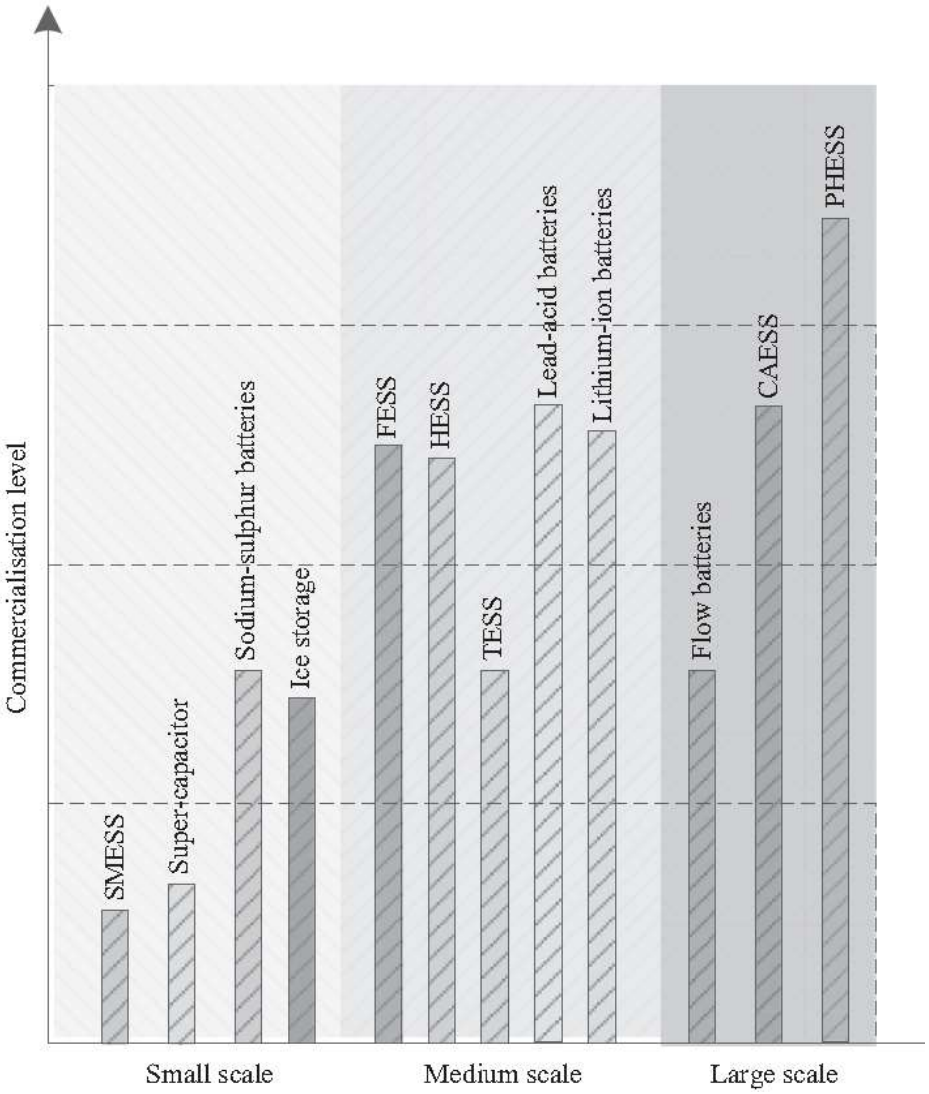
DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۱-۴- میزان ریسک و سرمایه‌گذاری فناوری برای هر فناوری بر اساس بلوغ [۱۲]

سیستم‌های ذخیره‌سازی به طبقه‌های در حال توسعه، توسعه‌یافته و بلوغ یافته دسته‌بندی شده‌اند[۱۲]. باتری‌های سرب‌اسیدی، CAES، تلمبه‌ای برقابی فناوری‌های بلوغ یافته‌ای هستند و ریسک فنی و سرمایه‌گذاری پایینی دارند. فناوری‌های فلایویل، ذخیره‌سازی یخ، باتری‌های سدیم سولفور و لیتیوم یون توسعه یافته‌اند در حالیکه ابرخازن‌ها، ذخیره‌سازی حرارتی و هیدروژن و مغناطیس ابررسانا در حال توسعه هستند[۱۴-۱۶]. همچنین روند تجاری‌سازی فناوری‌ها در برابر ظرفیت توان در شکل زیر نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است تلمبه برق-آبی کاملا تجاری شده است در حالیکه مغناطیس ابررسانا و ابرخازن‌ها فناوری‌های جدید در مقیاس کوچک هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۱-۵- سطح تجاری‌سازی فناوری برای مقیاس‌های مختلف [۱۷]

در حقیقت تلمبه برق-آبی به عنوان بهترین گزینه برای بهینه‌سازی معضلات سیستم فوق توزیع برق به دلیل ظرفیت بالا و داشتن زمان دشارژ طولانی در توان اسمی [۱۷].

۱-۶- هزینه‌های ذخیره‌سازی انرژی

برای مقایسه هزینه عملیاتی فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، بازدهی تجهیز، هزینه سرمایه‌گذاری انرژی/توان، و طول عمر سیکلی باید به صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد[۱۸-۲۰]. جدول زیر پارامترهای هزینه‌ای فناوری‌های ذخیره‌سازی را خلاصه کرده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

جدول ۱-۲- پارامترهای هزینه‌ای، بازدهی و عمر فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی

ذخیره ساز	هزینه $/Kw	هزینه $/kWh	هزینه Cent/kWh در هر سیکل	بازدهی (٪)	عمر	عمرسیکلی
PHS	۲۰۰۰-۶۰۰	۲۰۰-۱۰	۲-۰,۱	۷۰-۸۰	>۵۰	>۱۵۰۰۰
CAES	۱۰۰۰-۴۰۰	۵۰-۴	۵-۳	۴۱-۷۵	>۲۵	>۱۰۰۰۰
FES	۳۵۰-۲۵۰	۵۰۰۰-۱۰۰۰	۸۰-۵	۸۰-۹۰	۱۵-۲۰	۱۰۰۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰
یون-لیتیم	۱۰۰۰-۶۰۰	۴۰۰-۳۰۰	۴۵-۷	۸۵-۹۸	۶-۱۵	۵۰۰-۱۰۰۰۰
NaS	۳۰۰۰-۱۰۰۰	۵۰۰-۳۰۰	۲۰-۸	۷۰-۸۵	۱۰-۱۵	۲۵۰۰-۴۵۰۰
باتری جریانی	۲۵۰۰-۷۰۰	۱۰۰۰۰-۱۵۰	۸۰-۵	۶۰-۷۵	۵-۲۰	>۱۰۰۰۰
ابرخازن	۳۰۰-۱۰۰	۲۰۰۰-۳۰۰	۲۰-۲	۹۷-۸۵	۵	<۵۰۰۰۰
SMES	۳۰۰-۲۰۰	۱۰۰۰۰-۱۰۰۰	-	۷۵-۸۰	عدم دسترسی	عدم دسترسی

۱-۷- مزایا

مزایای ذیل برای کاربرد ادوات ذخیره‌سازی انرژی در سیستم توزیع متصور است:

- تامین ولتاژ
- پایدارسازی شبکه
- کاهش تلفات
- افزایش اطمینان‌پذیری
- به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در خطوط انتقال

- بهبود تولید منابع تجدیدپذیر
- هموارسازی تولید تجدیدپذیر
- شیفت تولید تجدیدپذیر
- تعدیل فرکانس
- اینرسی مجازی[1]
- حایگزینی ذخیره چرخان
- مدیریت رمپ
- کاهش هزینه انرژی
- تسطیح بار

پرتفوی فناورانه راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی محدوده وسیعی از خدمات مورد نیاز برای سیستم توان را پوشش می‌دهد که می‌تواند بر پایه ارتباط بین انرژی ذخیره شده و توان قابل پخش تقسیم‌بندی شود

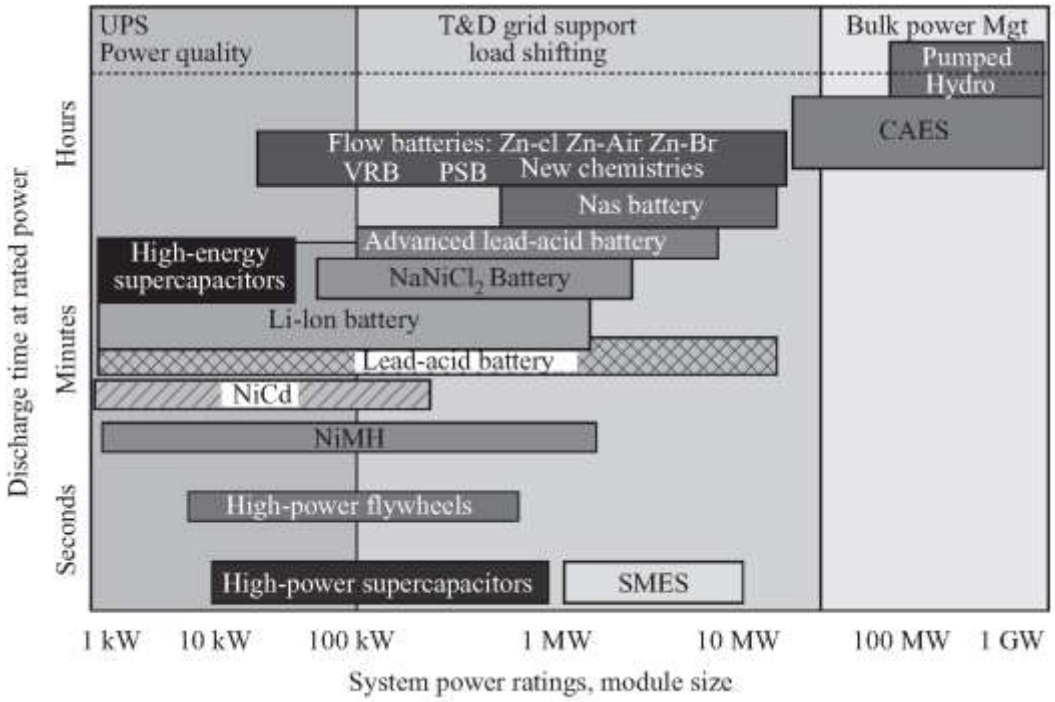
به جهت ذخیره‌سازی موفق انرژی، سیستم ذخیره‌سازی باید:

- برای کاربردهای با ظرفیت بالا، زمان دشارژ طولانی طراحی شده باشد این موضوع باعث سودآوری بالاتر برای نیروگاه‌ها شود که امکان استفاده از مزایای ایجاد شدن در نوسان قینا انرژی در طول روز بهره‌مند شود.
- طول عمر اقتصادی داشته باشد
- بازدهی بالا (تلفات کم) و هزینه نگهدای کم داشته باشد

مکان استفاده مناسب از هر یک از فناوری‌ها با توجه به کاربرد و زمان دشارژ در شکل زیر نشان داده شده است.

[1] Virtual Inertia

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۱-۶- زمان دشارژ فناوری بر اساس اندازه سیستم [۲۱]

۱-۸- کاربردهای ذخیره‌سازی

ذخیره‌سازی انرژی یک پدیده یا کاربرد جدید نیست. از سال ۱۷۹۹ باتری مدن توسط ولتا توسعه یافته است. در ادامه و در سال ۱۷۸۰، گالوانی الکتریسیته حیوانات را مطرح کرد. در سال ۱۸۳۶، باتری‌ها در سیستم‌های تلگراف مورد استفاده قرار گرفتند. در حدود ۱۸۸۰، برخی سیستم‌های خصوصی در نیویورک شب‌ها توسط سیستم‌های باتری سرب-اسیدی متصل به سیستم جریان مستقیم تامین شده است. این کاربرد موضوع پاسخگویی سمت مصرف‌کننده را مطرح کرد که در زمان کاهش بار ذخیره‌سازی اتفاق بیافتد و در زمان افزایش بار، توان نامین می‌شود. اولین سیستم ذخیره‌سازی برق در مقیاس بالا با پمپ با ظرفیت ۳۱ مگاوات در آمریکا در سال ۱۹۲۹ توسعه داده شده است. تا اواسط ۱۹۸۰، ذخیره‌سازی انرژی در آمریکا فقط برای انتقال از زغال سنگ به گاز طبیعی در پیک بار استفاده می شد[۱ و ۲۱].

 DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۱-۸-۱- کاربردهای ذخیره سازها در شبکهٔ الکتریکی:

- **شبکهٔ برق (تولید توان رایج، سرویس و عملکرد شبکه)**

الف) کاهش هزینه های تولید با استفاده از تلمبه ذخیره ای برای شیفت زمانی که انرژی را در ساعات غیر پیک ذخیره می کند و در مواقع شیفت به شبکه بازمیگرداند.

ب) حفظ کیفیت توان، ولتاژ و فرکانس با استفاده از ذخیره ساز انرژی در موقع نیاز؛

ج) به تأخیر انداختن سرمایه گذاری لازم با کاهش ازدحام بار شبکه در زمان پیک؛

د) فراهم کردن توان پایدار برای سیستمهای خارج از شبکه و

ه) فراهم ساخت توان در مواقع ضروری.

- **استفاده از تلمبه برقابی برای زمان شیفت و کیفیت توان:**

از تلمبه برقابی از قدیم برای کاهش هزینه ها در زمان پیک و کنترل فرکانس شبکه استفاده می شده است. در مدلهای قدیمی نمیشد کنترل فرکانس را نیز انجام داد اما در مدلهای جدید که به Variable-speed-control موسوم هستند، می توان این کار را با تغییر سرعت دورانی موتور انجام داد.

- **استفاده از هوای فشرده برای شیفت زمانی و کیفیت توان:**

فقط دو سیستم هوای فشردهٔ دیاباتیک در دنیا وجود دارند که در حال کار هستند. یکی در آلمان است ساخت سال ۱۹۷۸ به ظرفیت ۳۲۱ مگاوات دشارژ و دیگری در امریکا ساخت سال ۱۹۹۱ به ظرفیت ۱۱۰ مگاوات. هر دوی این سیستم درحالت غیرپیک شارژ شده و در زمان پیک دشارژ می شوند. مابقی سیستمها در حال نصب و راه اندازی هستند که بیشتر سیستمهای آدیاباتیک هستند.

- **استفادهٔ با بازدهی بالاتر از توان شبکه:**

باتریهای لیتیم-یون می توانند بیشترین بازدهی را از توان شبکه داشته باشند. در سال ۲۰۰۹، شرکت AES و A123 سیستم یک سیستم ۱۲ مگاوات به ظرفیت ۳ مگاوات ساعت نصب کردند. این سیستم به خرابی ها و نوسانات شبکهٔ برق کمک می کند. باتری هزینهٔ این کار را کاهش می دهد و پاسخدهی بهتری می تواند داشته باشد.

- **تأمین توان اضطراری:**

زیرساختهای حیاتی مانند ایستگاه های تولید توان، ایستگاههای مخابراتی و توزیع شبیه آنها به منابع انرژِ نیاز دارند که کیفیت برق بهتری همراه با اطمینان بالا بدست دهند. بهمین دلیل در اینگونه کاربردها از منبع توان DC با کمک باتریها استفاده می شود. باتریهای سرب–اسید از قدیم برای این منظور مورد استفاده قرار می گرفته اند.

- **سیستمهای خارج از شبکه (off-grid):**

در شهرها و روستاهای کوچک که جمعیت کمی در حدود چند هزار نفر ساکن هستند، درکنار منبع تولید توان مثل موتور دیزل، از باتری برای تأمین توان مورد تقاضا استفاده می شود تا درصورتیکه نیاز توان تغییر کرد، بتوان آن را پاسخ داد. وقتیکه شبکه ای از سیستم فتوولتائیک درحدود کمتر از ۵۰۰ کیلووات توان تولید می کند، بهتر است از سیستمهای سرب–اسید استفاده شود.

- **مصرف کننده (UPSها):**

برق ارزانتر در ساعات پیک برای مصرف کنندگان نتیجهٔ استفاده از ادوات ذخیرهٔ انرژی می باشد. همچنین UPSها این امکان را فراهم می آورند تا برق با کیفیت بالا برای سازمانها و ساختمانهای مهم و حیاتی و تجاری فراهم سازند[۲۲–۲۷].

۱–۸–۲– کاربردهای جدید

این کاربردها در پنج دسته قرار می گیرند: انرژی های تجدیدپذیر، شبکه های هوشمند، میکروشبکه های هوشمند، خانه های هوشمند و خودروهای الکتریکی که البته خودروهای الکتریکی از موضوع این گزارش خارج است.

- **انرژی‌های تجدیدپذیر:**

برای حل مشکلات زیست محیطی انرژیهای تجدیدپذیر مانند باد و خورشیدی بسیار مورد استفاده قرار گرفته اند. اما این انرژیها دچار تغییراتی می شوند و در تولید آنها بخاطر مسائل محیطی مشکل ایجاد می شود. بنابراین لازمست تا از سیستمهایی استفاده شود که این تغییرات و نوسانات را به حداقل برساند. این کار براساس ظرفیت تولید توان در سه دسته قابل طبقه بندی است: کیلووات ساعت، مگاوات ساعت و گیگاوات ساعت.
علاوه بر شیفت زمانی با استفاده از سیستمهای ذخیرهٔ انرژی، همچنین روشهای دیگری برای تنظیم بین عرضه و تقاضا وجود دارد. برای مثال می توان در نقاطی منابع تأمین توان تجدید پذیر بیشتری نصب کرد و در مواقع نیاز به آن قسمتهایی که انرژی کم است ارسال کرد. این کار می تواند هزینهٔ ذخیره سازی انرژی را نیز کمتر کند[۲۸–۳۰].

- **سیستمهای ذخیرهٔ انرژی غیرمتمرکز برای سیستمهای فتوولتائیک در ظرفیتهای کیلووات ساعت:**

با افزایش سیستمهای نصب شدهٔ فتوولتائیک، شبکهٔ ولتاژ پایین به حد عملکرد خود می رسد. معمولاً اینگونه سیستمها برای شبکه های خانگی و کوچک کاربرد دارد و بنابراین به دو کنتور نیاز است تا بتوان این ارتباط انرژی را برقرار کرد. یک کنتور باید مقدار برق مصرفی از شبکه را گزارش کند و یکی مقدار برق فروخته شده به شبکه از طریق سیستمهای فتوولتائیک. مقدار انرژی که مصرف نمی شود نیز می توان در باتری ذخیره شود. برای مثال مصرف یک خانه در سال حدود ۳۴۰۰ کیلووات ساعت تخمین زده می شود. بنابراین نیاز بع یک سیستم فتوولتائیک ۱۰/۷ کیلووات و سیستم ذخیرهٔ انرژی ۶ کیلووات ساعت داریم. در این حالت قیمت تعیین کننده هزینهٔ باتری می باشد و در حال حاضر باتری سرب–اسید دارای کمترین هزینه بر واحد کیلووات ساعت می باشد. اگرچه باتری یون–لیتیم بازدهی بهتری داشته و تعداد سیکل کاری بیشتری دوام می آورد ولی هزینهٔ اولیهٔ آن بیشتر است. باتریهای نیکلی NaNiCl نیز مناسبند اما نیاز به کار سیکلی روزانه دارند تا از گرم شدن زیادی آنها جلوگیری بعمل آید.

- **سیستمهای ذخیرهٔ انرژی برای کاربرد در تولید انرژی بادی (و فتوولتائیک) در ظرفیتهای مگاوات ساعت:**

یک مثال از این سیستم در ژاپن می باشد که توربینهای بادی ۵۱ مگاووات بهمراه باتریهای سدیمی نصب شده اند. با استفاده از باتریهای سدیمی نصب شده می توان خروجی این سیستم بادی را تسطیح کرده و طوری تنظیم کرد که توان خروجی بیشتر از ۴۰ مگاوات نشود.

- **شبکه های هوشمند:**

شبکه های امروزی عموماً مبتنی بر یک نیروگاه مرکزی بزرگی هستند که توان را به سیستمهای توزیع ولتاژ پایین و متوسط میرسانند. در این صورت جریان توان یک جهته می باشد و از ایستگاه های توان و طی شبکه های توزیع و انتقال به مصرف کنندهٔ نهایی می باشد. دیسپاچینگ توان و کنترل شبکه معمولاً توسط تجهیزات مرکزی انجام می شود و مصرف کننده دخالت چندانی در آن ندارد.

در یک سیستم هوشمند هدف این است تا مصرف و تولید مدیریت شوند. با مدیریت طرف ایجاد و مصرف می توان بازدهی انرژی را بالا برد. دریک سیستم هوشمند اجزای مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند که یکی از مهمترین آنها سیستم ذخیرهٔ انرژی می باشد. دلایل استفاده از سیستم ذخیرهٔ انرژی بشرح زیر می باشد:

۱– نفوذ هرچه بیشتر انرژیهای تجدیدپذیر در تولید توان. سیستم ذخیره انرژی می تواند قابلیت سیستم را در کنترل شارژ و دشارژ از کاربران شبکه افزایش دهد و باعث می شود تا عدم تعادل بین توان مصرف کننده و تولید کننده از بین برود.

۲– در برخی موارد، سیستم ذخیره انرژی می تواند سرمایه گذاری در زیرساختهای تولید توان را کاهش دهد مانند ترانسفورماتورها، خطوط توزیع و انتقال بخصوص در ساعات پیک. سیستم های ذخیرهٔ انرژی همچنین می توانند برای افزایش قابلیت کنترل فرکانس نیز مورد استفاده قرار گیرند.

۳- گزینهٔ دیگر مدیریت بخش تقاضاست که شامل شبکه های هوشمند درگیر و مصرف کنندگان خانگی می شود. با مدیریت هوشمند مصرف . مشوقهای اقتصادی می توان مصرف کنندگان را ترغیب کرد تا بسمت خرید توان در مواقعی که برق ارزانتر است بروند. آنها می توانند این برق ارزانتر را ذخیره کرده و سپس وقتی نیاز دارند از آن استفاده کنند.

انواع سیستمهای ذخیرهٔ انرژی الکتروشیمیایی مورد استفاده در شبکه های هوشمند باتریهای سرب–اسید و سدیمی می باشند و در برخی موارد باتریهای یون–لیتیم مورد استفاده قرار می گیرند. همچنین باتریهای ردوکس نیز دارای پتانسیلهایی هستند چراکه بین انرژی و توان آنها استقلال وجود دارد و منجر به ذخیره سازی موثر و با بازدهی بالای انرژی می شوند[۲۹-۳۱].

- **میکروگریدهای هوشمند:**

یک کارخانهٔ هوشمند، ساختمان هوشمند، بیمارستان هوشمند، مغازهٔ هوشمند یا دیگر مصرف کنندهٔ متوسط شبکه با سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی بعنوان میکروگرید هوشمند شناخته می شود. برای انعطاف پذیری در زمان وقایع مختلف، بسیار مهم است تا از میکروگریدهای هوشمند استفاده کرد که منابع توان هوشمند را توزیع می کند. سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی یک جزء مهم و ضروری از میکروگرید هوشمند است که باید قابل رشد، مستقل و قابل اتصال به دیگر شبکه های برق باشد. معماری یک میکروگرید هوشمند متشکل از یک کنترلر تنهاست و براساس سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی قابل بزرگ شدن دارد. میکروگرید و سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی بطور کلی باید به شبکه متصل باشند حتی اگر یک میکروگرید هوشمند مشخصی متصل به شبکه نباشد مانند یک جزیرهٔ ایزوله شده. همچنین بهتر است این قابلتی را داشته باشد تا بطور هومشند تنظیم شود چراکه میکروگرید هوشمند ایزوله شده می تواند منقبض یا منبسط شود.

- **خانه های هوشمند:**

این مفهوم برای استفاده از انرژی با بازدهی بالاتر معرفی شده است بخصوص از نظر اقتصادی و اطمینان پذیری در مناطق مسکونی. سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی نقش بسیار مهمی در این رابطه ایفا می کنند.

۱- هزینهٔ مصرف شامل شارژ مورد تقاضا (کیلووات) و شارژ انرژی (کیلووات ساعت) می شود. تسطیح بار توسط سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی می تواند تقاضای پیک را کاهش دهد اگرچه افت شارژ و دشارژ می تواند همزمان مقدار مصرف را فزایش دهد. مصرف کنندگان می توانند با بهینه سازی سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی هزینهٔ برق خود را کاهش دهند.

۲- برخی مصرف کنندگان ترجیح می دهند تا از منابع انرژی تجدیدپذیر خودشان بهره برند. سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی می تواند این عدم انطباق بین تقاضا و تولید خودشان را پوشش دهد.

۳- در برخی موارد خاص مثل توقف در برق رسانی، اکثر واحدهای تولید توان تجدیدپذیر ایزوله دچار مشکلاتی می شوند چراکه تولید آنها غیر قابل کنترل می شود. در این مواقع سیستم ذخیره سازی انرژی الکتروشیمیایی می تواند راه حلی برای این امر باشد[۳۲و۳۳].

۱-۹- نتیجه‌گیری:

روشهای ذخیره سازی که در بالا بدان اشاره شده است، پرکاربردترین روشهای ذخیره سازی است. برخی از این روشها از زمانهای قبل درحال استفاده و بهره برداری می باشند درحالیکه برخی دیگر اخیراً معرفی شده اند. نکتهٔ قابل توجه این است که در اکثر این فناوریها بمحض معرفی، مورد بهره برداری قرار می گیرند. موارد مختلفی برای استفاده از این فناوریها بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای مثال در مورد روشهای مکانیکی، اگرچه توان بسیار بالایی در مقایسه با بسیاری از روشهای دیگر ذخیره سازی انرژی بدست می دهد، اما باید توجه داشت که حجم ذخیره سازی انرژی در این روشها بسیار پایین است. برای مثال در مورد فلایویل، زمان تأمین انرژی تنها ۱۲ ثانیه است و این منجر به خاص شدن این روش ذخیره سازی انرژی برای کاربردهای خاص می شود. بنابراین کاربرد مشخص میسازد که روش ذخیره سازی انرژی چه می تواند باشد. در مورد ذخیره سازها، مدت زمان وارد شدن آنها به شبکه بسیار حائز اهمیت می باشد. برای مثال روشها مکانیکی مانند تلمبه ذخیره ای قابلیت توان بسیار بالا دارند اما مدت زمان ورود آنها به شبکه نسبتاً زیاد می باشد. همچنین برای روشهای حرارتی نیز می باشد. بنابراین مجدداً روشهای حرارتی نه برای پیک سایی یا کنترل فرکانس که برای افزایش بازدهی تولید انرژی در ساعات عادی مورد اتسفاده قرار می گیرد یا اینکه از گرمای ذخیره شده برای مبدلهای حرارتی استفاده می شود.

عمر ذخیره ساز انرژی بسیار حائز اهمیت است. باتریها در این مورد دچار نقصان هستند و نیاز به بهینه سازیهایی دارند. برای مثال باتریهای نیکل-کادمیم دارای اثر حافظه ای هستند و اگرچه توان بسیار بالایی را می توانند تأمین کنند, اما با برگشت شرایط به حالت عادی لازمست تا برق آنها بطور کامل تخلیه شده و سپس مورد شارژ مجدد قرار گیرند. با احتساب این شرایط استفاده از باتریهای قابل شارژ با اثر حافظه ای در بسیاری از موارد مانند بالانس شبکه موجب هدررفت انرژی و سرمایه خواهد شد. باتریهای لیتیمی که در دو دههٔ اخیر معرفی و روانهٔ بازار مصرف شده اند، توانسته اند جای خوبی در این بین داشته باشند بطوریکه بیشترین تعداد پروژه بر اساس فناوری ذخیره ساز انرژی بدانها اختصاص دارد. اخیراً در کالیفرنیای امریکا استفاده از نیروگاه ذخیره سازی انرژی با استفاده از باتریهای لیتیمی بر راه اندازی یک نیروگاه با توربین گاز برای تأمین برق در ساعات پیک ارجحیت داده شده است و این همزمان با کاهش قیمت باتریهای لیتیمی انجام شده است. آیندهٔ این نوع از باتریها در سیستمهای ذخیره سازی انرژی بدلیل بالا بودن دانسیتهٔ توان و انرژی آنها بسیار روشن می باشد.

در مور سیستمهای تلمبه برق آبی، توان بالا بهمراه زمان بالا منجر به توسعهٔ بیش از پیش آنها شده است. مسئلهٔ مهم در مورد این نوع از ذخیره سازها اولاً محل جغرافیایی آنها و ارزیابی های دقیق اقتصادی و محیط زیستی می باشد. ثانیاً باید توجه داشت این نوع از نیروگاه های ذخیره ساز در حجم توان بسیار بالا مدنظر می باشند و عملاً برای توانها پایین استفاده از آنها مقرون بصرفه نمی باشد.

هزینه های راه اندازی، تعمیر و نگهداری، بازگشت سرمایه، عمر ذخیره ساز، استراتژیک بودن آن، قیمت برق در زمانهای مختلف، شرایط جغرافیایی محل ذخیره ساز و عوامل متعدد دیگری در تعیین نوع ذخیره ساز برای احداث در محلی خاص با کاربرد مورد نظر مد نظر بایستی قرار بگیرند.

آنچه در این مورد نیاز به توجه دارد، رصد فناوری است. برای مثال اخیراً روش ذخیره ساز انرژی در امریکا رو به توسعه قرار گرفته است که دو فناوری ذخیره ساز حرارتی و الکتروشیمیایی را مورد استفاده قرار داده است. این روش که به باتریهای فلز مذاب موسوم هستند، همزمان می تواند حرارت و برق را در خود ذخیره کند. بنابراین می تواند آیندهٔ بسیار مناسبی در در ذخیره سازی انرژی در نیروگاه های حرارتی داشته باشد. ابرخازنها در فناوریهای قدیمی تنها قادر به ارائهٔ انرژی در زمانهای کاری کوتاه بودند. با پیشرفتهای انجام شدهٔ اخیر در این زمینه هم اکنون ابرخازنهای الکتروشیمیایی قادرند تا بیش از ۱۰ ساعت توان را تأمین کنند. این نوع از ابرخازنها به تازگی در زمینهٔ ذخیره سازهای انرژی معرفی شده اند و ۴ پروژه از این دست در دنیا در حال انجام می باشد.

باتوجه به توضحات فوق در مورد ذخیره سازهای انرژی بنظر میرسد لازمست در نقشهٔ راه ارائه شده نکات زیر مدنظر قرار گیرد.

۱-۱۰- مراجع:

[1] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, 'Progress in electrical energy storage system: A critical review'. *Progress in Natural Science.* 2009;19(3):291–312.

[2] S. M. Hasnain, 'Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques'. *Energy Conversion and Management.* 1998; 39(11):1127–38.

[3] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, 'Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications'. *Renewable* and Sustainable Energy Reviews. 2009;13(6):1513–22.

[4] Horn, 'A perovskite oxide optimized for oxygen evolution catalysis from molecular orbital principles'. *Science.* 2011;334(6061):1383–85.

[5] C. Ponce de Leo´n, A. Frı´as-Ferrer, J. Gonza´lez-Garcı´a, D. A. Sza´nto, and F. C. Walsh, 'Redox flow cells for energy conversion'. *Journal of Power Sources.* 2006;160(1):716–32.

[6] J. Eyer, G. Corey, and S. N. Laboratories, '*Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide : A Study for the DOE Energy Storage Systems Program'*. United States: Sandia National Laboratories; 2010.

[7] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, 'Energy storage systems for advanced power applications'. *Proceedings of the IEEE.* 2001; 89(12):1744–56.

[8] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, 'Energy storage systems for transport and grid applications'. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2010;57(12):3881–95.

[9] A. F. Burke, 'Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles'. *Proceedings of the IEEE.* 2007;95(4):806–20.

[10] F. Dı´az-Gonza´lez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafa´fila-Robles, 'A review of energy storage technologies for wind power applications'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2012;16(4):2154–71.

[11] M. Hasheminamin, V. G. Agelidis, A. Ahmadi, P. Siano, and R. Teodorescu, 'Single-point reactive power control method on voltage rise mitigation in residential networks with high PV penetration'. *Renewable Energy.* 2018;119:504–12.

[12] A. Ahmadi, J. Aghaei, and H. A. Shayanfar, 'Stochastic self-scheduling of hydro units in joint energy and reserves markets'. in *2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2011; pp. 1–5.

[13] H. Moghimi, A. Ahmadi, J. Aghaei, and A. Rabiee, 'Stochastic technoeconomic operation of power systems in the presence of distributed energy resources'. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2013;45(1):477–88.

[14] A. Rezvani, M. Gandomkar, M. Izadbakhsh, and A. Ahmadi, 'Environmental / economic scheduling of a micro-grid with renewable energy resources'. *Journal of Cleaner Production.* 2015;87:216–26.

[15] M. Izadbakhsh, M. Gandomkar, A. Rezvani, and A. Ahmadi, 'Short-term resource scheduling of a renewable energy based micro grid'. *Renewable Energy.* 2015;75:598–606.

[16] M. Khalid, A. Ahmadi, A. V. Savkin, and V. G. Agelidis, 'Minimising the energy cost for microgrids integrated with renewable energy resources and conventional generation using controlled battery energy storage'. *Renewable Energy.* 2016;97:646–55.

[17] *'Grid Energy Storage'*. U.S. Department of Energy;2013.

[18] S. Koohi-Kamali, V. V. Tyagi, N. A. Rahim, N. L. Panwar, and H. Mokhlis, 'Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2013;25:135–65.

[19] X. Tan, Q. Li, and H. Wang, 'Advances and trends of energy storage technology in microgrid'. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.* 2013;44(1):179–91.

[20] D. O. Akinyele and R. K. Rayudu, 'Review of energy storage technologies for sustainable power networks'. *Sustainable Energy Technologies and Assessments.* 2014;8:74–91.

[21] M. Charwand, A. Ahmadi, P. Siano, V. Dargahi, and D. Sarno, 'Exploring the tradeoff between competing objectives for electricity energy retailers through a novel multi-objective framework'. *Energy Conversion and Management.* 2015;91:12–18.

[22] F. H. Gandoman, A. Ahmadi, A. M. Sharaf, *et al.*, 'Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018;82:502– 4.

[23] H. Mavalizadeh, A. Ahmadi, F. H. Gandoman, P. Siano, and H. A. Shayanfar, 'Multiobjective robust power system expansion planning considering generation units retirement'. *IEEE Systems Journal.* 2017; PP(99):1–12.

[24] H. L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, and J. P. Lopes, 'Characterisation of electrical energy storage technologies'. *Energy.* 2013;53:288–98.

[25] M. C. Lott, S.-I. Kim, C. Tam, D. Houssin, and J. Gagne´, 'Technology roadmap: Energy storage'. International Energy Agency; *Paris.* 2014.

[26] J. Eyer, G. Corey, and S. N. Laboratories, '*Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide : A Study for the DOE Energy Storage Systems Program'*. United States: Sandia National Laboratories; 2010.

[27] S. Sabihuddin, A. Kiprakis, and M. Mueller, 'A numerical and graphical review of energy storage technologies'. *Energies.* 2015;8(1):172–216.

[28] A. Esmaeily, A. Ahmadi, F. Raeisi, M. R. Ahmadi, A. Esmaeel Nezhad, and M. Janghorbani, 'Evaluating the effectiveness of mixed-integer linear programming for day-ahead hydro-thermal self-scheduling considering priceuncertainty and forced outage rate'. *Energy*. 2017;122:182–93.

[29] A. Ahmadi, J. Aghaei, H. A. Shayanfar, and A. Rabiee, 'Mixed integer programming of multiobjective hydro-thermal self scheduling'. *Applied Soft Computing.* 2012;12(8):2137–46.

[30] S. Shafiee, H. Zareipour, A. M. Knight, N. Amjady, and B. Mohammadi- Ivatloo, 'Risk-constrained bidding and offering strategy for a merchant compressed air energy storage plant'. *IEEE Transactions on Power Systems.*2017;32(2):946–57.

[31] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, 'Flywheel energy and power storage systems'. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2007;11:235–58.

[32] S. C. Smith, P. K. Sen, and B. Kroposki, 'Advancement of energy storage devices and applications in electrical power system'. in *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008; pp. 1–8.

[33] H. Akbari and O. Sezgen, 'Performance evaluation of thermal energy storage systems'. *Energy and Buildings.* 1995;22(1):15–24.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فصل ۲: شناسایی انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی با پاسخ سریع و روند توسعه فناوری‌ها در سایر کشورها و تعیین سیستم ذخیره‌سازی مرجح در کشور

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

در این فصل در ابتدا به معرفی تمامی سیستم‌های ذخیره سازی انرژی بر حسب روش ذخیره سازی پرداخته و در نهایت سیستم‌های با قابلیت پاسخ سریع و مرجح در کشور معرفی می‌شوند.

۲-۱- روشهای ذخیرهٔ انرژی

در ادامه انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی به صورت جزئی بررسی می‌شود [۱-۱۱].

۲-۱-۱- مکانیکی:

- **هوای فشرده[۲]:** در این روش، انرژی بصورت هوای فشرده در تانک مورد نظر ذخیره می شود. این سیستم ذخیره سازی انرژی کاربردهای صنعتی زیادی بخصوص در ادوات پنوماتیک و ابزار دقیق دارد. اکثر سیستمهای پنوماتیکی بکار رفته در صنعت معمولاً با هوای فشرده یا گازهای بی اثر فشرده راه اندازی می شوند مانند کمپرسورهای سیلندری که با موتور الکتریکی راه اندازی می شوند و موتورهای هوایی. هنگامیکه نیاز به سیستمهای ارزان قیمت، انعطاف بیشتر یا جایگزین ایمن تر برای موتورهای الکتریکی باشد، سیستم پنوماتیک انتخاب می شود. موارد متعددی در مورد ادوات حمل و نقل بر مبنای عملکرد هوای فشرده گزارش شده است که هیچکدام به مرحلهٔ تجاری نرسیده اند. در مقایسه با باتریهای قابل شارژ، دارای مزایایی برای ذخیرهٔ انرژی هستند؛ اگرچه در تولید انبوه بدلیل هزینهٔ بالای تولید تانک ذخیرهٔ هوای فشرده، عملاً گرانتر از باتریهای قابل شارژ می باشند. مجموعهٔ پژو-سیتروئن اعلام کرده بود که می خواهد مدل ۲۰۸ خود را بطور هیبرید با سیستم هوای فشرده در سال ۲۰۱۶ روانهٔ بازار کند که تا کنون (آوریل ۲۰۱۷) این کار صورت نگرفته است. طبق آماری که توسط دپارتمان انرژی آمریکا منتشر شده است، تعداد ۱۹ پروژه در دنیا در زمینهٔ ذخیره سازی انرژی با استفاده از هوای فشرده انجام شده است که مجموعاً ۱۵۹۵ مگاوات ظرفیت ذخیره سازی انرژی دارند. سیستم هوای فشرده دو مدل دارد که عبارتست از ماژولار و in-gorund. در نوع ماژولار ظرفیت توان پایینتر مدنظر قرار دارد.

[۲] Compressed air energy storage (CAES)

- **فلایویل[۳]:** در این روش انرژی بصورت دورانی در یک فلایویل ذخیره می شود. هنگام استخراج انرژی، سرعت فلایویل کاسته شده و انرژی به بیرون منتقل می شود. در اغلب فلایویلها این تبدیل انرژی از طریق برق انجام می شود. جنس فلایویل در این ادوات کامپوزیتهای فیبر کربن است که توسط یاتاقانهای مغناطیسی نگهداشته می شود و سرعت آنها ۲۰ تا ۵۰ هزار دور بر دقیقه می باشد که در داخل محفظه ای خلأ است. بطور کلی فلایویلها قابلیت ذخیره سازی انرژی در حدود ۱۰۰Wh/kg را دارند و توان خروجی بسیار بالایی دارند. بازدهی انرژی آنها ۹۰٪ است و در ابعاد ۳-۱۳۳kWh ساخته می شوند. سرعت شارژ آنها بالا بوده و حدود ۱۵ دقیقه می باشد. البته سیستمهای تجاری حدود ۱۱wh/kg چگالی انرژی دارند. در مقایسه با باتریها، تحت تأثیر تغییرات دمایی قرار ندارند. ضرری برای محیط زیست ندارند و مدهای خرابی آنها به مراتب کمتر از باتریهاست و براحتی با بررسی rpm انها می توان مقدار انرژی موجود را بدست آورد. از نظر عمر محدودیت خاصی ندارند و میتوانند تا بیش از ۲۰۰ سال کار کنند. یکی از بزرگترین معایب آنها عدم قابلیت انعطاف در شکل و طرح می باشد و نیاز به یک فضای مشخص دارد که منجر به محدودیت آن در بسیاری از کاربردها می شود. ظرفیت آنها در مقایسه با باتریها برای انواع کاربردهای حمل و نقل پایینتر است. کاربردهای مختلف و آزمایشی برای آن ارائه شده است که مهمترین و کاربردی ترین آن استفاده در شبکهٔ انتقال برق است. کاربرد آن برای از بین بردن نوسانات شبکه می باشد. همچنین می توانند برای پیک سایی هم مورد استفاده قرار گیرند. در سراسر دنیا ۵۱ مورد پروژه در این زمینه انجام شده است که مجموعاً ظرفیت ۹۷۲MW می باشد. قدیمی ترین سیستم از این نوع در انستیتو ماکس پلانک در کشور آلمان برای تولید انرژی آزمایشات فوزیون می باشد که ظرفیت توان ۳۸۷MW داشته و در سال ۱۹۷۳-۱۹۸۷ راه اندازی شده است و متشکل از سه فلایویل جداگانه می باشد. پاسخدهی آن حداکثر ۱۲ ثانیه می باشد. تعداد دیگری از فلایویل در کشورهای دیگر نصب و راه اندازی شده است که آخرین آن مربوط به یک سیستم فلایویل ۲۰MW است که تا سال ۲۰۲۰ در کالیفرنیای آمریکا نصب خواهد شد.
- **پتانسیل گرانشی:** از این روش استفادهٔ بسیار محدودی انجام شده است و بیشتر در حد ایده می باشد. طی این روش با ایجاد اختلاف ارتفاع در یک جسم یا مایع (مثل آب) انرژی جنبشی یا الکتریکی تبدیل به انرژی پتانسیل گرانشی می شود و در لحظهٔ مورد نیاز می تواند تخلیه شود. ایده های مختلفی در این رابطه بکارر فته است که تنها پروژهٔ انجام شده مربوطست به پروژه ای بنام Advanced Rail Energy Storage Nevada (ARES) که در سال ۲۰۱۳ آغاز شده است و قرار است در سال ۲۰۱۹ به بهره برداری برسد. این پروژه مبتنی است بر حرکت یک قطار با استفاده از روش ذخیرهٔ انرژی بروش گرانشی. توان قابل ارائه ۵۰ مگاوات در زمان ۱۵ دقیقه

[۳] Flywheel Energy Storage (FES)

می باشد. عمر کاری این ذخیره ساز ۲۵ سال و هزینهٔ آن ۴۶ میلیون دلار می باشد. البته استفاده از آن در شبکهٔ انرژی مد نظر می باشد.

- **هیدرولیک:** در این روش مایع هیدرولیک مانند روغن را تحت فشار از سمت گاز (هیدرو-پنوماتیک)، فنر یا جسم جامد قرار می دهند. این نوع از ذخیره سازی انرژی کاربردهای بسیار محدودی داشته و برای مثال در سیستمهای تعلیق خودرو نه بخاطر ذخیره سازی انرژی، بلکه به جهت برآوردن کردن سیال مورد نیاز تحت فشار خاص مورد اتسفاده قرار می گیرد.
- **تلمبه برق-آبی[۴] (تلمبه ذخیره‌ای):** در این روش آب بروش پمپی در مخزنی ذخیره شده و در وقت نیاز با جریان یافتن آن، ژنراتورها الکتریسیته تولید کرده و وارد شبکهٔ برق می نمایند. این نوع از ذخیره سازها بیشترین ظرفیت ذخیره سازی انرژی را در سراسر دنیا دارند و برطبق آمار وزارت انرژی آمریکا، ۳۵۲ پروژه در دنیا در این زمینه انجام شده است که مجموعاً ظرفیتی معادل با ۱۸۳۸۰۰ مگاوات توان تولید می کنند. نوع مدار باز آن کاربرد بیشتری داشته و ۳۳۲ پروژه به این نوع اختصاص دارد که ظرفیتی معادل ۱۸۳۸۰۰ مگاوات توان بدست می دهد. تقریباً ۹۵٪ از توان تولیدی ذخیره سازها در سراسر دنیا به تلمبه ذخیره ایها اختصاص دارد درحالیکه فقط ۲۰٪ پروژه‌های ذخیره سازی انرژی می باشند. تنها پروژهٔ مربوط به ذخیره سازی انرژی در ایران مربوط به نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای سیاه بیشه می باشد که قابلیت تولید ۱۰۴۰ مگاوات توان را دارد.
- **هیدروالکتریسیته (سد):** اگرچه آب پشت سد می تواند نوعی از ذخیرهٔ انرژی مکانیکی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی در وقت نیاز باشد، اما بطور کلی نوعی از ذخیره سازی انرژی محسوب نمی شود.

۲-۱-۲- الکتریکی:

- **خازنها:** این ادوات متشکل از دو صفحهٔ رسانا و یک دی الکتریک بین آنها می باشند که می توانند انرژی را در خود ذخیره کنند. معمولاً کاربرد این ادوات در وسایل الکترونیکی است که بتوانند توان مورد نیاز را حین نوسانات باتری بدست دهند و کاربردی از نظر ذخیره سازی انبوه انرژی ندارند.

[۴] Pumped-storage hydroelectricity

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

- **مغناطیس ابررسانا[5]:** با ایجاد جریان مستقیم در کویل ابررسانا، کویل شارژ می شود و جریان از بین نمی رود و می توان انرژی را بصورت نامحدود ذخیره کرد. این روش در ابعاد صنعتی موجود نیست و کار بر روی آن در حال انجام است. رصد فناوری در این حوزه حائز اهمیت می باشد.

۲-۱-۳- الکتروشیمیایی:

رایج ترین روش ذخیره سازی انرژی الکتریکی است و بیشتر مبتنی بر باتریهای قابل شارژ است.

- **باتری جریانی:** این نوع از باتریها اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند. از مزایای این باتریها قابلیت شارژ و دشارژ سریع می باشد. در برخی موارد از آنها با باتریهای وانادیمی یاد می شود. اگرچه شیمی های دیگری نیز در این نوع از باتریها بکار گرفته شده است. درحال حاضر ۱۰۱ پروژه در دنیا به ظرفیت ۱۳۸ مگاوات با استفاده از این باتریها انجام شده است که اکثراً بعد از سال ۲۰۱۰ معرفی شده اند و بیشتر آنها در مرحلهٔ اجرا هستند و هنوز راه اندازی نشده اند. نکتهٔ قابل توجه این است که در ۲۶ کشور از این روش برای ذخیره سازی انرژی استفاده شده است که بیانگر انعطاف این فناوری در استفاده می باشد.
- **باتریهای قابل شارژ (سرب-اسید؛ نیکل-کادمیم؛ نیکل-هیدرید فلز؛ یون-لیتیم؛ نمک مذاب و ...):** بیشترین تعداد پروژه های انجام شده در دنیا مشخصاً به ذخیره سازهای الکتروشیمیایی مبتنی بر باتریهای قابل شارژ تمرکز دارد. ۹۸ پروژه در دنیا به ظرفیت ۱۷۴ مگاوات به باتریهای سرب-اسید تخصیص دارد. در مورد باتریهای پایه نیکل (نیکل-کادمیم و نیکل-هیدرید فلزی) ۷ پروژه به ظرفیت ۳۲ مگاوات انجام شده است. باتریهای پایه سدیم ۷۸ پروژه با ظرفیت مگاوات و باتریهای یون-لیتیم ۶۲۵ پروژه با ظرفیت ۲۱۰۲ مگاوات بخود تخصیص داده اند. باتریهای نوظهور فلز-هوا (روی-هوا) نیز ۶ پروژه به ظرفیت ۲۰ مگاوات بخود اختصاص داده اند.
- **ابرخازنها:** این نوع از خازنها که بر مبنای ذخیره سازی الکتروشیمیایی عمل می کنند نیز اخیراً مورد ت.جه زیادی قرار گرفته اند و ۳۲ پروژه با ظرفیت ۷۹ مگاوات قابلیت تولید توان دارند.

[5] Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

۲-۱-۴- حرارتی:

بطور کلی روشهای ذخیره سازی انرژی بروش حرارتی به سه دستهٔ عمده تقسیم بندی می شوند: ذخیره گرما در یک محیط جامد یا مایع (آب، شن و ماسه، نمک مذاب و ...)؛ ذخیره گرما با استفاده از موادی که دچار تغییر فاز در اثر حرارت می شوند (مثل جامد به مایع) و روشهای ذخیره سازی شیمیایی-گرمایی. روشهای معرفی شده در زیر مهمترین این روشها می باشند.

- **نمک مذاب:** این روش برای بدام انداختن گرمای تولید شده بکار می رود و می تواند برای تولید برق در شرایط بد آب و هوایی یا شبها مورد استفاده قرار گیرد. ترکیب نمک مورد نظر در ۱۳۱ درجهٔ سانتیگراد ذوب می شود و در ۲۸۸C بصورت مایع نگهداری می شود. این نمک در داخل پنلها وارد می شود که در آنجا اشعهٔ خورشید بصورت متمرکز به ۵۶۶C میرسد و سپس به یک تانک ذخیرهٔ عایق فرستاده می شود که می تواند تا ماهها ذخیره شود. وقتی نیاز به برق است، با پمپ نمک داغ به یک ژنراتور بخار، بخار بسیار داغ برای توربین/ژنراتور مرسوم تولید می شود. یک توربین ۱۰۰ مگاوات به یک تانک با قطر ۲۴ و ارتفاع ۹ متر نیاز دارد تا بتواند ۴ ساعت کار کند. ۴۱ پروژهٔ ذخیره ساز حرارتی در دنیا بر این مبنا کار می کنند که مجموعاً قابلیت تولید توان ۲۷۵۲ مگاوات را دارند. نکتهٔ جالب این است که ۲۳ پروژه از این دست در اسپانیا انجام شده است. این روش ۷۶٪ از ذخیره سازی بروش حرارتی را بخود اختصاص می دهد.این روش بیشتر برای مزارع سولار مورد استفاده قرار می گیرد.
- **ذخیره سازی آب خنک (Chilled Water):** در این روش تانکی وجود دارد که آب سرد از پایین توسط چیلرها و پمپ بدان تزریق می شود. این تانک همیشه مملو از آب است و بخاطر گرادیان دمایی، گرادیان غلظتی نیز وجود داشته و می تواند مورد استفاده قرار گیرد. ۲۱ پروژه از این دست در سراسر دنیا انجام شده است که مجموعاً ظرفیت ۱۳۷ مگا وات را بدست می دهد. کشور آمریکا دربردارندهٔ ۱۹ مورد از این ذخیره ساز حرارتی می باشد. فعالیت چندانی در سالهای اخیر در مورد این نوع از ذخیره سازها انجام نشده است.
- **ذخیره سازی یخ:** در این روش از گرمای نهان تبدیل یخ و آب استفاده می شود. یخ تا ۲۵٪ حجم کمتری نسبت به آب دارد. از طرف دیگر چیلرهای تولیدکنندهٔ یخ بازدهی پایینتری دارند. ۱۱۶ پروژه از این نوع روش ذخیره سازی در دنیا انجام شده است که مجموعاً ۱۱۲ مگاوات قابلیت تولید توان دارند. از این تعداد ۱۱۴ پروژه در امریکا انجام شده است.
- **دیگر روشهای ذخیره سازی با استفاده از یک محیط بجز نمک مذاب:** مجموعاً شامل ۲۲ پروژه و ظرفیت ۱۳۰ مگاوات می شود. در این روشها از مواد دیگری مثل بخار برای ذخیره سازی حرارت استفاده می شود.

۲-۱-۵- شیمیایی:

در روشهای شیمیایی عموماً الکتریسیته برای تبدیل به یک سوخت مورد استفاده قرار می گیرد.

- **بیوسوختها:**
- **روش ذخیره بصورت سوخت گازی:**
  - هیدروژن: یا الکترولیز آب می توان هیدروژن و اکسیژن را ذخیره کرد. ۱۳ پروژه در دنیا به این روش ذخیره سازی انرژی انجام می دهند که مجموعاً توانی معادل ۱۸ مگاوات بدست می دهند. از این مقدار ۱۴ مگاوات آن در آلمان تولید می شود و تنها کشوری است که بیش از یک واحد ذخیره ساز انرژی از این دست دارد. کشور آمریکا هیچ ذخیره سازی از این دست ندارد.
  - متان: استفاده از هیدروژن و دی اکسید کربن برای تولید متان طی واکنش Sabatier.
  - استفاده از خروجی سوخت چوب یا بایوگاز و بهینه سازی سوخت بایوگاز.
- **روش ذخیره بصورت مایع:**
  - متانول: هیدروژن تولیدی توسط روشهای تجدیدپذیر مثل باد و خورشیدی بهتر است به صورت متانول درآیند.
  - بیوسوختها: بیودیزل، سوختهای الکلی یا بیومس می توانند جایگزین سوختهای فسیلی شوند. قیمت نفت بالای ۳۵ دلار در هر بشکه این روش را مقرون به صرفه می کند. هم اکنون در افریقای جنوبی بیشتر دیزل مصرفی از ذغال سنگ تولید می شود.
- **روش ذخیره بصورت جامد:**
  - آلومینیوم، بور، سیلیکون . روی: می توان آنها را با استفاده از مصرف برق تولید کرد و بعداً مورد استفاده قرار داد.

۲-۱-۶- ذخیره سازهای حرارتی مبتنی بر سیستمهای تهویه و تبرید

ذخیره سازهای حرارتی یکی از اصلی ترین و چالشی ترین روشهای ذخیره سازی می باشند. این ذخیره سازها نه تنها برای ذخیره سازی انرژی الکتریکی، بلکه برای ذخیره سازی حرارت و گرمای به هدر رفته در فرایندهای تولید برق نیز می تواند مورد استفاده قرار گرفته و منجر به افزایش

بازدهی سیستم تولید و انتقال نیرو گردد. این نوع از ذخیره سازها خود در چهار گروه اصلی قرار می گیرند که بتفصیل در ضمیمه بررسی شده است و برای جمع بندی باختصار در اینجا بدان پرداخته می شود.

- **ذخیره سازی سیال (آب) سرد[۶]:**

در این نوع از سیستمهای ذخیره سازی انرژی از برق برای خنک سازی آب استفاده می شود که برای خنک کاری فضاها مورد استفاده قرار می گیرد. اکثر مشتریان این دسته از ذخیره سازهای انرژی، مکانهای عمومی هستند که مصرف برق زیادی بخاطر تأسیسات سرمایشی دارند. برای مثال دانشگاه ها، بیمارستانها، مراکز نظامی و شبیه آنها. نکتهٔ اصلی در مور ای نوع از ذخیره سازها طراحی تانک ذخیره کنندهٔ مایع خنک کاری یا آب می باشد. البته باید توجه داشت که این نوع از خنک کاری بیشتر در امریکای شمالی مورد استفاده قرار می گیرد و اگر قرار باشد در ایران نیز مورد استفاده قرار گیرد لازمست در طراحی سیستمهای تهویه و تبرید تغییراتی اعمال شود. اما در مجموع این موضوع می تواند برای استفاده در ایران بسایر مناسب باشد و در توان تولیدکنندگان و شرکتهای داخلی قرار دارد. عمده هدف این نوع از ذخیره سازی انرژی، نه برای برگشت دادن توان به مدار، بلکه برای شیفت زمان پیک و کاهش بار در اوج مصرف مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین منجر به کاهش هزینه های مصرف کننده نیز می بشود. بعلاوه، چون اکثراً این نوع از ذخیره سازی در ساعات نیمه شب انجام می شود، بدلیل خنک تر بودن هوا به نسبت روز، عملاً برق کمتری نیز استفاده می شود. معمولاً ظرفیت توان مورد استفاده در حدود ۲–۳ مگاوات می باشد.

- **ذخیره سازهای حرارت[۷]:**

این نوع از ذخیره سازهای انرژی می توانند حرارت را در خود جای دهند و قطعاً دارای موارد مصرفی بسیار متنوع تری هستند. بطور کلی این نوع از ذخیره سازها برای ذخره سازی حرارت مزارع خورشیدی تولید انرژی مورد استفاده قرار می گیرند. در این نوع از ذخیره سازها اغلب از آب، بخار، روغن یا مواد تغییر فاز دهند استفاده می شود. این نوع از ذخیره سازی انرژی می تواند در کاربردهای گرمایشی و یا تولید برق مورد استفاده قرار گیرد. بطور کلی حدود ۲۲ پروژه در دنیا در این نوع ذخیره سازی ثبت شده است که همگی طی سالیان ۲۰۰۶ به بعد بوده اند و همچنان ادامه دارند. کاربردهای آنها اکثراً برای افزایش اطمینان پذیری شبکه های تجدیدپذیر و مزارع خورشیدی می باشد. این نوع از ذخیره سازی در ایران مورد توجه بیشتر در سالهای آینده لازمست قرار گیرد چراکه هدف گسترش انرژیهای تجدیدپذیر نیز درحال انجام است. از مزایای این نوع از ذخیره سازهای انرژی این است که می توان با استفاده از فناوری داخلی این کار را انجام داد.

---

[۶] Chilled Water

[۷] Heat Thermal Storage

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

- **نمکهای مذاب[۸]:**

نمکهای مذاب از قدیم برای انتقال حرارت در سیستمهای راکتورهای هسته ای مورد استفاده قرار داشته است. در دماهایی بالاتر از ۱۰۰ درجهٔ سانتیگراد که آب تبخیر می شود، ناگزیر از نمکهای مذاب استفاده می شود. این نوع از ذخیره سازها برای ذخیره سازی حرارت بسیار مفید می باشند. درحال حاضر حدود ۴۴ پروژه در سطح دنیا از این فناوری برای ذخیره سازی انرژی استفاده می کنند که اغلب مربوط به بعد از سال ۲۰۱۱ و بسیار جدید می باشند. کاربرد آنها عمدتاً برای ذخیره سازی انرژی مورد استفاده در نیروگاه های خورشیدی حرارتی[۹] است. ظرفیت توانی آنها بدلیل قرار گیری آنها در کنار نیروگاه های حرارتی خورشیدی بسیار بالا می باشد و توان آنها اغلب در بازهٔ چند ده مگا وات می باشد و حجم ذخیره سازی آنها برای چندین ساعت تا یک شبانه روز می باشد. حجم سرمایه گذاری آنها نیز بسیار بالا بوده و در حدود چند صد میلیون دلار و زیر مجموعهٔ طرحهای کلان قرار می گیرد. یکی از عمده ترین مصرف کننده های این فناوری اسپانیا می باشد که ۱۳ مجتمع ذخیره سازی با ظرفیت بیش از ۵۵۰ مگاوات می باشد. زمان ذخیره سازی برای این نیروگاه ها نیز اغلب در حدود ۷ ساعت می باشد. کاربرد این نوع ذخیره ساز نیز کاملاً مشخص است و برای ساعاتی که خورشید در آسمان نیست از این گرمای ذخیره شده برای تولید انرژی در طول ساعات شب استفاده می شود. همچنین این قابلیت را دارد که برای تولید انرژی مورد مصرف در خود سایت یا برای شیفت اوج مصرف مورد استفاده قرار گیرد. این نوع از ذخیره سازی بسیار جذاب و کاربردی است و در آینده و حال می تواند بسیار مورد استفاده در داخل کشور قرار گیرد. اما مسئلهٔ اصلی مربوط به حجم سرمایه گذاری بالای آن می باشد که طرحها را در حد کلان و ملی نشان می دهد که اغلب خارج از توان شرکتها می باشد. بنابراین لازمست تا در این زمینه فعالیتهای مالی و اقتصادی بیشتر صورت گیرد و زیرساختها برای سرمایه گذاریهای کلان در این زمینه انجام شود. اما در عین حال می تواند از برخی ابعاد مورد توجه قرارگیرد. مثلاً در امریکا با کمک آزمایشگاه ملی ساندیا[۱۰] در نیومکزیکو، یک مرکز تحقیقاتی تنها با ۱۴۰ کیلووات ظرفیت راه اندازی شده است که برای کارهای تحقیقاتی و تستها و استانداردها مورد استفاده قرار می گیرد و اولین در نوع خود در نیا می باشد. اینگونه از فعالیتها برای کاربردهای کوچک می تواند مفید باشد. بنابراین لازمست تا در این زمینه نیز فعالیت صورت گیرد و پتانسیلهای استفاده از این فناوری بیشتر مورد بحث قرار گیرد. در سند بهتر است این نوع از فناوری زیر مجموعهٔ آینده قرار گیرد و با سرعت معقولی روی آن تحقیق و توسعه صورت گیرد.

---

[۸] Thermal Storage Molten Salt

[۹] Concentrated Solar Power (CSP)

[۱۰] Sandia National Lab

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

- **ذخیره سازی با استفاده از یخ[11]:**

تقریباً تنها استفاده کننده از این روش برای ذخیره سازی انرژی امریکا می باشد. در ایرلند و کانادا نیز در هر کدام تنها یک پروژه انجام شده است. این می تواند بیانگر محدودیتهای بسیاری در این زمینه باشد و البته نقطهٔ امیدی از این نظر که این فناوری می تواند در آینده مورد استفاده در سطح بین المللی قرار گیرد. کلیت این نوع از ذخیره سازی انرژی بدین ترتیب است که می توان برق را در ساعات غیر پیک برای ساختن یخ مورد استفاده قرار داد. این یخ بعداً می تواند برای خنک سازی مورد ساتفاده قرار گیرد. دو شرکت Ice Energy و CALMAC در این زمینه سردمدار هستند که دو پروژه انجام شده در کشورهای ایرلند و کانادا نیز مربوط به این دو شرکت می باشد. ده ها پروژه در این زمینه در ظرفیت تولید توان چند ده کیلووات تا چند صد کیلووات توسط این دو شرکت انجام شده است که اغلب برای امکان و نقاط پرمصرف از نظر سیستمهای تهویه و تبرید و گرمسیری می باشند. امکان عمومی مانند اداره ها و پاساژها و مجتمعهای مسکونی بزرگ بیش از همه مورد توجه می باشند و ظرفیت ذخیره سازی بگونه ای انجام می شود که می تواند تا حداقل ۴ ساعت را جوابگو باشد. بدین ترتیب با تغییر زمان پیک مصرف به ساعات شب، هم باعث کاهش پیک مصرف و هم باعث کاهش هزینهٔ مصرفی می شوند. این نوع از فناوری برای ایران که دارای آب و هوای گرمسیری و خشک بخصوص در نقاط جنابی می باشد می تواند بسیار مفید باشد. باتوجه باینکه این نوع از ذخیره سازی انرژی در کشور امریکا بیشتر از همه مورد استفاده قرار گرفته است، پس نمی توان از نظر فناوری با آنها همکاری داشت و لازمست تا این فناوری در داخلی کشور و بصورت بومی رشد پیدا کند. البته برای این کار نیاز به فناوری پیچیده ای نبوده و بسیاری از شرکتها می توانند در این زمینه همکاری موثری انجام دهند. این زمینه از کار نیز میبایستی در سند ذخیره سازی انرژی گنجانده شود.

۲-۱-۷- هیدورژن (متان؛ متانول):

در خارج از کشور، بیشترین حجم از پروژه های ذخیره سازی انرژی با استفاده از هیدروژن به کشور آلمان برمی گردد. این کشور بدلیل علاقه به مصرف سوخت برای وسایل نقلیه و بخصوص حمل و نقل با استفاده از پیل سوختی از این نوع از ذخیره سازی انرژی الکتریسیته به گاز استفاده می کند. یک نمونه از این پروژه توسط شرکت آئودی می باشد که دی اکسید کربن ناشی از زیست توده را به متان تبدیل می کند که خلوص بسیار بالایی داشته و می تواند برای خودروهای گازسوز مورد استفاده قرار گیرد. بهمین ترتیب می توان هیدروژن را نیز تولید کرد و برای استفاده در خودروهایی که از هیدروژن استفاده می کنند مورد استفاده قرار گیرد و نیاز به توسعهٔ زیر ساخت انتقال گاز هیدروژن را بطور کلی حذف کرده و

[11] Ice Thermal Storage

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

باعث حضور سریعتر این نوع از وسایل نقلیهٔ پاک در کشور شود. بعلاوه هیدروژن بدلیل کاربرد بسیار زیادی که در انواع صنایع دارد می تواند مورد استفاده قرار گیرد. کشور آلمان هدفگذاری کرده است تا سال ۲۰۲۵ بتواند ۱۰۰۰ مگاوات از انرژی را بصورت هیدروژن ذخیره سازی کند که در حال حاضر به ۱۶ مگاوات آن دست یافته است. باید توجه داشت این نوع از ذخیره سازی انرژی تحت عنوان کلی تر تبدیل برق به گاز[۱۲] (سوخت) قابل بررسی است. اکثراً این نوع از ذخیره سازی به جهت تبدیل برق به سوختهای ارزشمندتر مانند هیدروژن یا متان و متانول و حتی بنزین مورد استفاده قرار میگیرد و می تواند بطور بسیار موثر و مستقیمی منجر به کاهش آلودگی های هوا و همچنین گرم شدن کرهٔ زمین گردد. منابع برق براحتی می تواند از شبکهٔ تجدیدپذیر یا غیر تجدیدپذیر استفاده شود. این نوع از تبدیل و ذخیره سازی انرژی برق در سند توسعهٔ ذخیره سازهای انرژی لحاظ نشده است که لازمست بطور جدی مورد توجه قرار گیرد چون فناورانه بوده و باتوجه به کاربردهای وسیع آن در صنایع مختلف می تواند دارای مشتریان بسیار زیادی باشد. برای افزایش بازدهی این نوع از ذخیره سازیها اکثراً از الکترولایزرها استفاده می شود که مبتنی بر فناوری پیل سوختی می باشد. در پروژه ای دیگر در آلمان یک واحد ذخیره سازی هیدروژن با ظرفیت ۱ مگاوات نصب شده است که برای یک مزرعهٔ بادی ۱۴۰ مگاواتی نصب شده است. باتوجه به کاربردهای بسیار زیادی که برای سوختهای حاصل از این نوع روشهای ذخیره سازی انرژی می توان در نظر گرفت، لازمست تا در سند توسعهٔ ذخیره سازهای انرژی به این مهم و تبدیل برق اضافی به سوخت توجه کافی مبذول گردد[۱۲-۱۴].

۲-۲- مقایسهٔ بین انواع ذخیره سازهای انرژی:

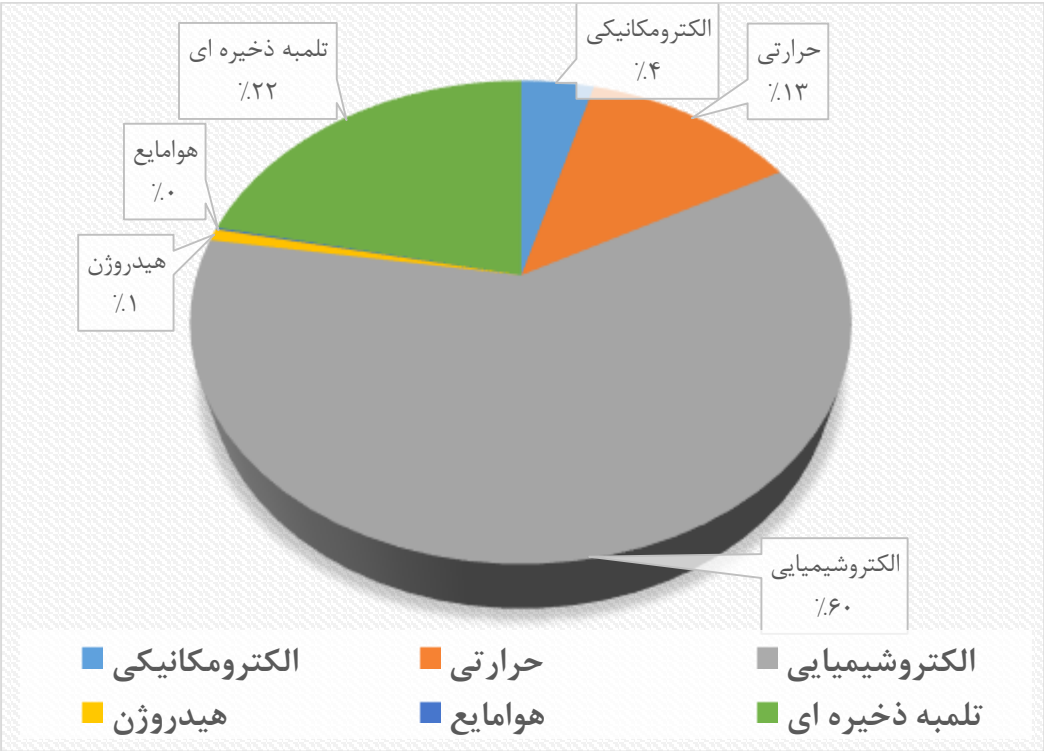
شکل ۱ زیر بصورت شماتیک نشان می دهد که چه مقدار از پروژه های تعریف شده در زمینهٔ ذخیره سازهای الکتریکی در دنیا تعریف شده است و سهم هر نوع از فناوری در این پروژه ها چقدر است[۱۵].

همانطور که در شکل ۲-۱ قابل مشاهده است، سهم ذخیره سازهای الکتروشیمیایی از این پروژه ها از همه بیشتر است بطوریکه بیش از ۶۰٪ از پروژه های انجام شده در زمینهٔ ذخیره سازی انرژی الکتریکی در شبکه های برق بروش الکتروشیمیایی می باشد. دلیل این امر نیز واضح است. باتریها بطور کلی این قابلیت را دارند که می توانند در ابعاد مختلفی از ظرفیت از مقادیر کم تا زیاد برای ذخیره سازی انرژی مورد استفاده قرار گیرند. استهلاک و هزینه های نگهداری آنها بمراتب بسیار پایینتر از انواع دیگر ذخیره سازهای انرژی می باشد و بیشترین هزینه برای خرید باتریها

[۱۲] E-gas

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

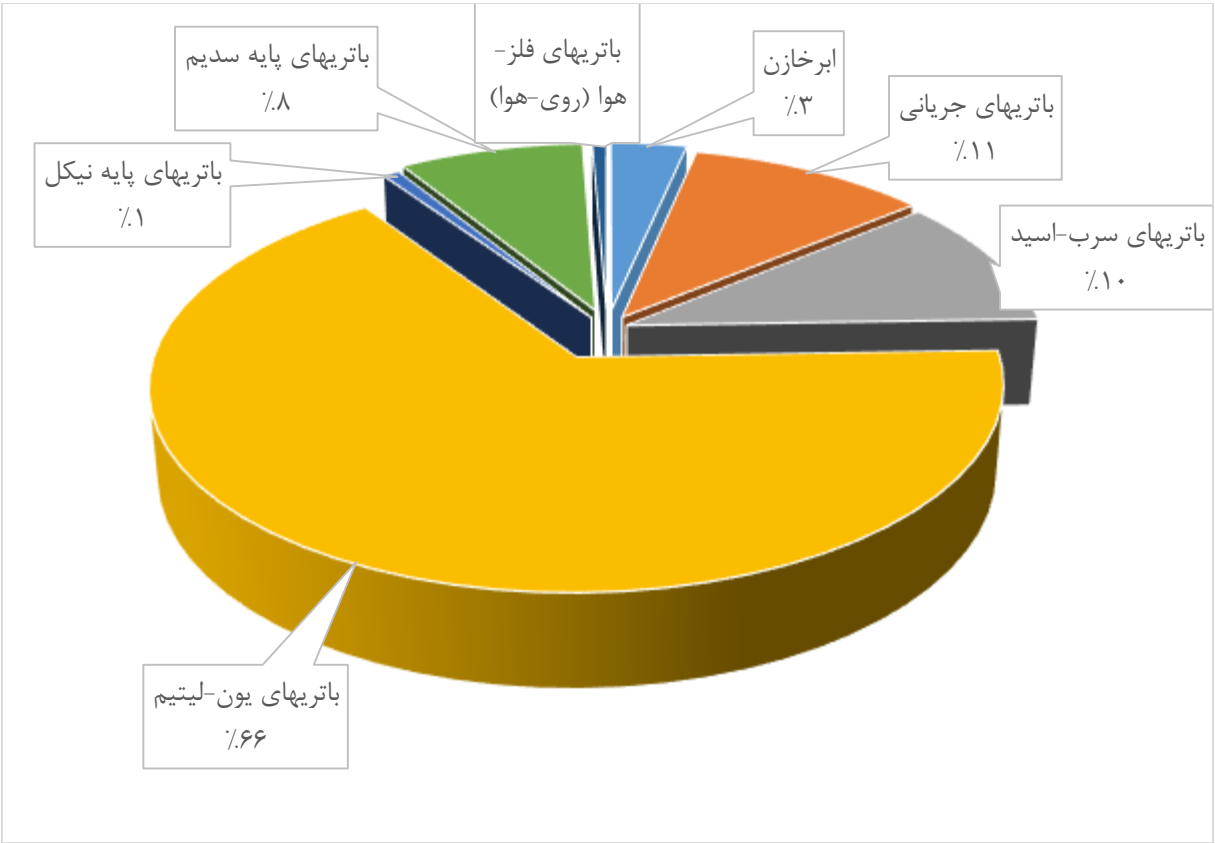
می باشد. همچنین باتریها این قابلیت را دارند که انرژی را در حدود بسیار زیادی از زمان کاری بدست دهند برخلاف بسیاری دیگر از انواع ذخیره سازهای انرژی که گاهی فقط در حد چند ثانیه می توانند شبکهٔ برق را ساپورت کنند[۱۵–۱۷].



شکل ۲–۱– تعداد پروژه های ثبت شده در دنیا در بحث ذخیره سازهای انرژی الکتریکی

شکل ۲–۲ توزیع فناوریهای مختلف مورد استفاده ذیل ذخیره سازهای انرژی بروش الکتروشیمیایی را نشان می دهد. در این شکل مشخص است که بیشترین سهم بین روشهای ذخیره سازی انرژی الکتریکی بروش الکتروشیمیایی مربوطست به باتریهای یون–لیتیم که از نظر تعداد پروژه های انجام شده در دنیا ۶۶٪ را بخود اختصاص داده اند و دربین انواع ذخیره سازهای انرژی بیش از همه مورد توجه قرار گرفته اند. باتریهای یون–لیتیم در دنیا ۶۲۵ بار برای ذخیره سازی انرژی مورد استفاده قرار گرفته اند که حدود ۳۸٪ از تعداد پروژه های تعریف شده در دنیا در مبحث ذخیره سازی انرژی الکتریکی می باشد[۱۷–۲۰].

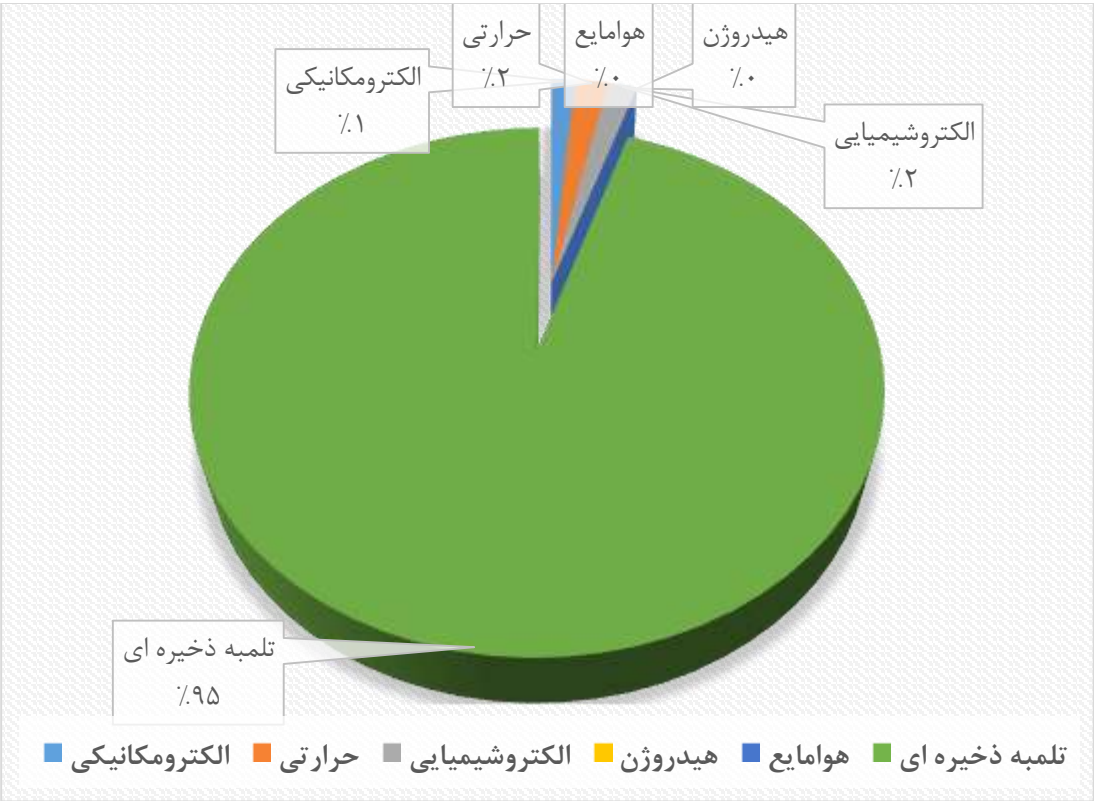
DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۲-۲- سهم هر نوع فناوری باتری در بین ذخیره سازهای الکتروشیمیایی

نکتهٔ مهم دیگر در مورد ذخیره سازهای انرژی الکتریکی مربوطست به مقدار توان قابل ارائه توسط آنها. برای مثال، در مورد ذخیره سازهای انرژی بروش الکتروشیمیایی اگرچه تعداد پروژه های انجام شده در دنیا بسیار بیشتر از انواع دیگر ذخیره سازهای انرژی می باشد، اما ظرفیت توان آنها پایین می باشد. شکل ۳ نشان می دهد که چه میزان توان توسط انواع ذخیره سازهای انرژی در دنیا قابل حصول است. مشخص است که حجم بسیار بالایی از توان قابل تولید ذخیره سازها در دنیا مربوط به تلمبه های ذخیره ای است که ۹۵٪ از توان شبکه را در صورت ضرور تأمین می کنند. بعد از این نوع از ذخیره سازها، سهم ذخیره سازهای حرارتی و الکتروشیمیایی تقریباً مساوی و هرکدام ۲٪ از توان مصرفی را در دنیا پوشش می دهند. پس از آن ذخیره سازهای الترومکانیکی و هیدروژن و هوامایع قرار دارند. درواقع حجم توان تولیدی از سیستمهای تلمبه برقآبی بیش از ۱۸۳GW در دنیا می باشد[۲۱و ۲۳-۲۵].

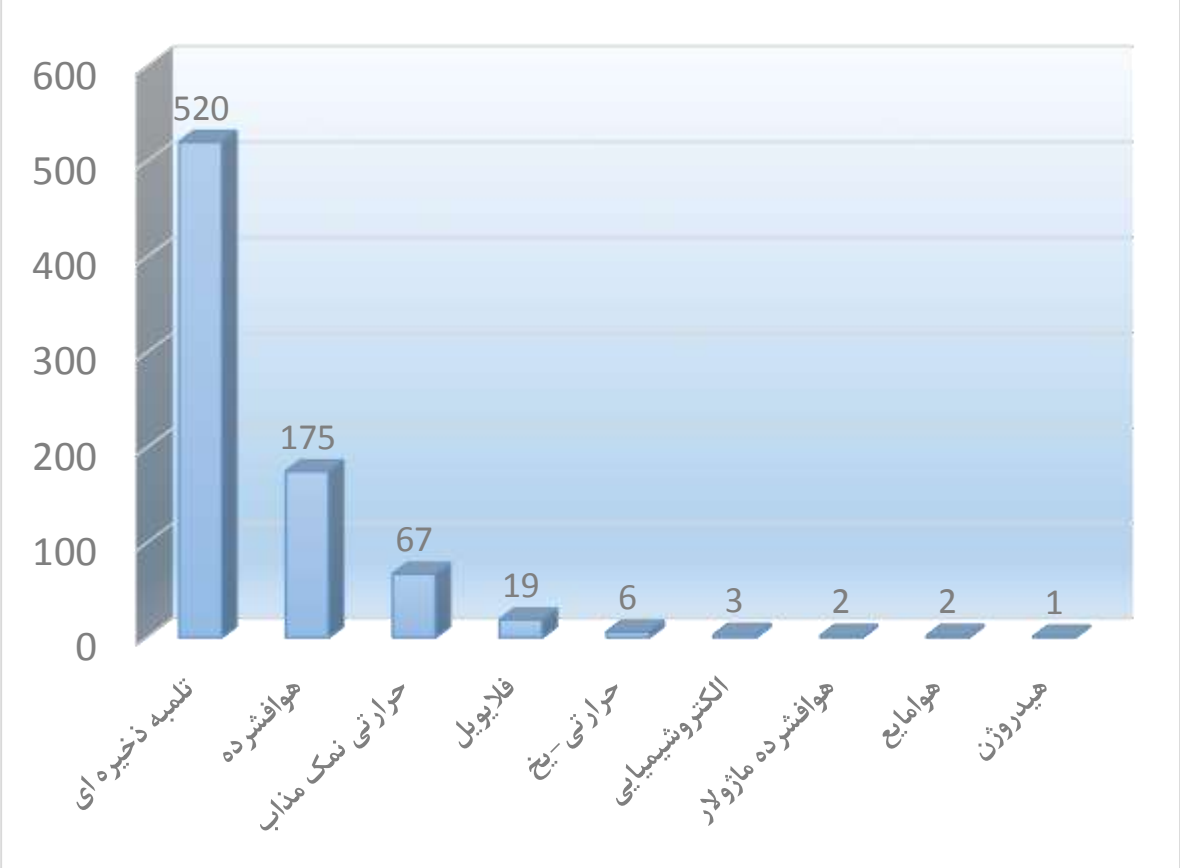
DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۲-۳- درصد سهم ذخیره سازهای انرژی در تولید توان در دنیا

آنچه میبایستی در مورد سیستم‌های ذخیره انرژی در نظر گرفت، کاربرد آنها می‌باشد. برخی از آنها می‌توانند توان بسیار بالایی را در زمان بسیار کوتاهی بدست دهند در حالیکه برخی از آنها می‌توانند توان کمتری را در مدت بسیار بیشتری ایجاد کنند. سیستمهای تلمبه برقآبی با میانگین ۵۲۰MW توان بالاترین را در بین انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی دارند. پس از آن سیستم‌های هوافشرده با میانگین توان ۱۷۵ مگاوات و سپس سیستم‌های حرارتی نمک مذاب با میانگین ۶۷ مگاوات در رتبه‌های بعدی قرار دارند. فلایویل با میانگین ۱۹ مگاوات در رتبهٔ بعدی قرار دارد. سیستمهای حرارتی دیگر، الکتروشیمیایی، هوافشردهٔ ماژولار، هوامایع و هیدروزن در یک بازه قرار داشته و با میانگین توان زیر ۱۰ مگاوات در رتبه های بعدی قرار میگیرند[۲۶ و ۲۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۲-۴- میانگین تولید توان برحسب سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی (MW)

پارامتر بسیار مهم در تعیین سیستم ذخیره ساز انرژی مربوط است به زمان ذخیره سازی انرژی الکتریکی و بازتولید آن. از میان این ۱۶۳۰ پروژهٔ انجام شده در سطح بین المللی، ۶۲۶ پروژه قابلیت تأمین توان بین ۱ تا ۴ ساعت را دارند. در این میان، ۵۷۸ پروژه یعنی ۹۲٪ از پروژه ها ذخیره سازهای الکتروشیمیایی هستند. ۲۶ پروژه حرارتی، ۱۱ پروژه الکترومکانیکی، ۹ پروژه تلمبه ذخیره ای (بجز یک پروژه همگی مربوط به قبل از سال ۱۹۸۹ هستند و اکثراً در آلمان قرار دارند) و ۲ پروژه هیدروژن می باشد. در مورد تأمین توان بالاتر از ۴ ساعت، ۱۸۳ پروژه انجام شده است که در این بین ۱۲۴ پروژه الکتروشیمیایی می باشد. بنابراین می توان دید هر نوع ذخیره سازی در کاربرد و شرایط خاصی اهمیت و مقبولیت داشته و چندین پارامتر انتخاب نوع ذخیره ساز را مشخص می کنند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

جدول ۲-۱- مشخصات انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی [۱و ۲۶-۲۸]

ذخیره ساز	ولتاژ	ظرفیت هرسل(Ah)	زمان پاسخدهی	چگالی انرژی (Wh/kg)	چگالی انرژی (Wh/l)	چگالی توان (W/l)	زمان دشارژ اسمی	بازدهی (٪)	عمر	عمرسیکلی	کاربردها
PHS	–	–	دقیقه	۰/۲-۲	۰/۲-۲	۰/۱-۰/۲	ساعتها	۷۰-۸۰	>۵۰	>۱۵۰۰۰	شیفت زمانی، کیفیت توان، اضطراری
CAES	–	–	دقیقه	–	۲-۶	۰/۲-۰/۶	ساعتها	۴۱-۷۵	>۲۵	>۱۰۰۰۰	شیفت زمانی
FES	–	۰/۷-۱/۷ مگاوات	ثانیه>	۵-۳۰	۲۰-۸۰	۵۰۰۰	ثانیه ها	۸۰-۹۰	-۲۰ ۱۵	-۱۰۰۰۰۰۰۰ ۲۰۰۰۰	کیفیت توان
سرب-اسید	۲/۰	۱-۴۰۰۰	ثانیه>	۳۰-۴۵	۵۰-۸۰	۹۰-۷۰۰	ساعتها	۷۵-۹۰	۳-۱۵	۲۵۰-۱۵۰۰	خارج شبکه، اضطراری، شیفت زمانی، کیفیت توان
NiCd	۱/۲	۲-۱۳۰۰ ۰/۰۵-۲۵	ثانیه>	۱۵-۴۰	۱۵-۸۰	۷۵-۷۰۰	ساعتها	۶۰-۸۰	۵-۲۰	۱۵۰۰-۳۰۰۰	خارج شبکه، اضطراری، شیفت زمانی، کیفیت توان
NiMH	۱/۲	۰/۰۵-۱۱۰	ثانیه>	۴۰-۸۰	۸۰-۲۰۰	۵۰۰-۳۰۰۰	ساعتها	۶۵-۷۵	۵-۱۰	۶۰۰-۱۲۰۰	خودروی الکتریکی

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

یون-لیتیم	۳/۷	۰/۰۵-۱۰۰	ثانیه<	۶۰-۲۰۰	۲۰۰-۴۰۰	-۱۰۰۰۰ ۱۳۰۰	ساعتها	۸۵-۹۸	۶-۱۵	۵۰۰-۱۰۰۰۰	کیفیت توان، بازدهی شبکه، خارج شبکه، شیفت زمانی، خودروی الکتریکی
روی-هوا	۱/۰	۱-۱۰۰	ثانیه<	۱۳۰-۲۰۰	۱۳۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	ساعتها	۵۰-۷۰	>۱	>۱۰۰۰	خارج شبکه، خودروی الکتریکی
NaS	۲/۱	۴-۳۰	ثانیه<	۱۰۰-۲۵۰	۱۵۰-۳۰۰	۱۲۰-۱۶۰	ساعتها	۷۰-۸۵	-۱۵ ۱۰	۲۵۰۰-۴۵۰۰	شیفت زمانی، بازدهی شبکه، خارج شبکه
NaNiCl	۲/۶	۳۸	ثانیه<	۱۰۰-۲۰۰	۱۵۰-۲۰۰	۲۵۰-۲۷۰	ساعتها	۸۰-۹۰	-۱۵ ۱۰	۱۰۰۰	شیفت زمانی، خودروی الکتریکی
VRFB[1]	۱/۶	-	ثانیه	۱۵-۵۰	۲۰-۷۰	۰/۵-۲	ساعتها	۶۰-۷۵	۵-۲۰	>۱۰۰۰۰	شیفت زمانی، بازدهی شبکه، خارج شبکه
HFB[2]	۱/۸	-	ثانیه	۷۵-۸۵	۶۵	۱-۲۵	ساعتها	۶۵-۷۵	۵-۱۰	۱۰۰۰-۳۶۵۰	شیفت زمانی، بازدهی شبکه، خارج شبکه

[1] Vanadium Redox Flow Battery

[2] Hybrid Flow Battery

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

هیدروژن	–	–	ثانیه–دقیقه	۳۳۳۳۰	۶۰۰	۰/۲–۲ ۰/۲–۲۰	ساعتها– هفته	۳۴–۴۴	–۳۰ ۱۰	۱۰۰۰–۱۰۰۰۰	شیفت زمانی
SNG[1]	–	–	دقیقه	۱۰۰۰۰	۱۸۰۰	۰/۲–۲	ساعتها– هفته	۳۰–۳۸	–۳۰ ۱۰	۱۰۰۰–۱۰۰۰۰	شیفت زمانی
DLC[2]	۲/۵	۰/۱–۱۵۰۰ فاراد	ثانیه>	۱–۱۵	۱۰–۲۰	–۱۲۰۰۰۰ ۴۰۰۰۰	ثانیه	۸۵–۹۸	۴–۱۲	–۱۰۰۰۰۰ ۱۰۰۰۰	کیفیت توان، اتصال موثر
SMES	–	–	ثانیه>	–	۶	۲۶۰۰	ثانیه	۷۵–۸۰	NA	NA	شیفت زمانی، کیفیت توان

[1] Synthetic Natural Gas

[2] Double Layer Capacitor

۲-۳- سیستم‌های با قابلیت شارژ سریع

با توجه به جدول ارائه شده مشخص است که سیستم‌هایی که پتانسیل استفاده در ذخیره‌سازی سریع را دارا هستند عبارتند از باتری‌ها، فلایویل، ابررساناهای مغناطیسی و ابرخازن‌ها. در ادامه به بررسی دقیق‌تر این سیستم‌ها پرداخته خواهد شد البته با توجه مطالب بیان شده در فصل اول و بلوغ نسبتا مناسب باتری‌ها، سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری دارای بیشترین پتانسیل برای استفاده در کاربردهای با پاسخ سریع هستند. بعلاوه بسبب قابلیت حمل و نقل باتریها و همچنین انعطاف در فضای مورد استفاده مورد استفاده در بسیاری از صنایع دیگر غیر از صنایع برق نیز هستند. در بسیاری از مراکز توزیع و تقویت فشار زیرمجموعهٔ وزارت نفت از باتریها برای تضمین کار شبانه روزی استفاده می شود. صنعت حمل و نقل از دیرباز متقاضی استفاده از باتریها بوده است و هم اکنون با گسترش خودروهای برقی این تقاضا بیش از پیش تقویت شده است. صنایع نظامی، صنایع وسایل خانگی و بسیاری دیگر از کاربردها مصرف کنندهٔ باتریها و بطور کلی ذخیره کننده های الکتروشیمیایی می باشند.

باتری هم صنعت سریعی است و هم کند. سریع است از این نظر که انواع زیادی از باتریها طی سالیان گذشته اختراع و ساخته شده اند و برای آینده نیز باتریهای مختلفی پیشنهاد شده است. از طرف دیگر کند است بخاطر اینکه تنها ۴ نوع از باتریهای قابل شارژ مورد استفادهٔ فراگیر در دنیا قرار گرفته اند و اولین نوع قابل شارژ آن که باتریهای سرب–اسید می باشد همچنان در حال تولید و مصرف است. بنابراین در این زمینه باید با احتیاط سرمایه گذاری انجام داد. باتریهای سرب–اسید اگرچه قدیمی ترین نوع باتریهای مورد استفاده در صنعت می باشند، اما رقبای بسیار جدی دارند و تنها دلیل فروش آنها هزینه می باشد. پس درصورتیکه برخی دیگر از انواع باتریها به این سطح از قیمت برسند، حتماً باتری سرب–اسید بازار خود را بسرعت از دست خواهد داد. پس حتماً باید در این زمینه نیم نگاهی به آیندهٔ این فناوریها داشت. فناوری ساخت باتری نیز بسیار اهمیت دارد. برای مثال تجهیزات مورد استفاده در ساخت باتری سرب–اسید برای ساخت باتری لیتیمی قابل استفاده نمی باشد. اما تجهیزات مورد استفاده در باتریهای لیتیمی می تواند برای دیگر انواع باتریهای آینده مورد استفاده قرار گیرد. فناوری لیتیمی نیز هم اکنون در دنیا بیش از ۲۸ سال از نظر تجاری قدمت دارد و بعنوان فناوری پیشرو دوران بلوغ خود را در حال سپری کردن می باشد. از نظر استراتژیک وابسته شدن صنایع به تأمین مواد اولیه نیز بسیار اهمیت دارد. بیشتر مواد اولیهٔ موجود در این صنعت از خارج از کشور تأمین می شود و بنابراین لازمست حتی در این صنعت نیز بسمتی حرکت شود که تأمین مواد در داخل انجام شود یا مثل دیگر کشورها بسمت فناوریهایی حرکت شود که این وابستگی را کاهش می دهد. برای مثال در امریکا صنعت باتری سدیمی بسیار مورد توجه قرار گرفته است چراکه از نظر استراتژیک صنعت باتری لیتیمی در بلند مدت به جهت ایجاد وابستگی این کشور به چین منطقی نمی باشد. بنابراین ما نیز لازمست در بلند مدت بسمت فناوریهایی برویم که برای کشورمان توجیه بیشتری دارند[۳و ۲۹].

۲-۳-۱- ابرخازنهای الکتروشیمیایی[۱]:

حدود ۲۹ پروژه در دنیا برای ذخیره سازی انرژی با استفاده از ابرخازنها مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی ذخیره سازی به این روش تسطیح بار، تنظیم فرکانس، شیفت بار، تامین ولتاژ وکاربردهای مربوط به حمل و نقل می‌باشد[۶]. کشورهای پیشرو در این زمینه کرۀ جنوبی، امریکا و اسپانیا می باشند که کرۀ جنوبی و امیکا بیش از همه برای اهداف حمل و نقل، ابرخازنها را مورد استفاده قرار داده اند. نوع حمل و نقل بیشتر متکی بر حمل و نقل ریلی برقی مانند مترو می باشد. مترو موقع ترمز کردن انرژی زیادی را از دست می دهد که این انرژی بدلیل توان بسیار بالا با استفاده از ابرخازنها به باتریها منتقل می شود و سپس برای شتابگیری قطار مجدداً از آن استفاده می شود. تعداد ۱۶ پروژه در کرۀ جنوبی برای ایستگاه های مترو مورد استفاده قرار گرفته است که توان آن در محدودۀ ۵۰۰ تا ۲۴۰۰ کیلووات می باشد. تایم ذخیره سازی آنها نیز در حدود کمتر از ۱ دقیقه می باشد. در متروهای نیویورک نیز ابرخازنها برای همین دلیل مورد ساتفاده قرار گرفته اند. فناور اصلی در این زمینه متعلق به شرکت Maxwell Technologies می باشد که شرکتی امریکایی است و بنابراین اگر دز این زمینه نیاز به همکار بین المللی باشد، نمی توان از این شرکت استفاده کرد. البتۀ شرکتهای دیگری هم هستند که در این زمینه خیلی صاحب نظر نبوده و نمی توان از آنها استفاده کرد. بطور کلی بدلیل رشد باتریهایی که می توانند با سرعت بسیار بالا شارژ شوند چه در ابعاد باتریهای لیتیمی یا باتریهای سیالی، استفاده از ابرخازنها خیلی منطقی در حال حاضر بنظر نمیرسد. بهمین دلیل گاهی برای مزارع بادی مواقعی که توان بسیار زیادی نیاز است مورد استفاده قرار گرفته اند. این پروژه ها اغلب قبل از سال ۲۰۱۵ انجام شده اند و بهمین دلیل خیلی مورد بحث بنظر در این مقال نمیرسند و بهتر است بر فناوریهای دیگر از الکتروشیمیایی توجه صورت گیرد. درصورت نیاز به دیگر کاربردها مانند خودروهای برقی می توان از ابرخازنها برای این زمینه استفاده کرد که بنظر میرسد در وهلۀ اول جزو اولویتهای وزارت نیرو نباشد.

۲-۳-۲- باتریهای فلز-هوا:

باتریهای فلز هوا دارای پتانسیل بسیار بالایی برای استفاده در آینده می باشند. دو نوع روی-هوا و لیتیم-هوا بیش از همه مورد توجه و استفاده قرار گرفته است. نوع روی-هوا بسبب سبقۀ قدیمی آن و همچنین خواص مطلوب و نوع لیتیم-هوا بدلیل ظرفیت بسیار بالا و چگالی حجمی و جرمی بسیار بالا مورد توجه بخصوص صنایع حمل و نقل و خودروهای الکتریکی قرار دارد[۸ و ۳۰] در ۶ پروژۀ انجام شده در دنیا در زمینۀ استفاده از این فناوری برای ذخیره سازی انرژی، نوع روی-هوا در همگی مورد ساتفاده قرار گرفته است. سه شرکت سازندۀ این فناوری هر سه امریکایی می باشند: EOS، Fluidic Energy و Western Grid Development. تعداد ۴ پروژۀ انجام شده از این نوع فناوری در

[۱] Ultracapacitors

امریکا و دوتای بقیه در اندونزی و ماداگاسکار می باشد. زمان ذخیره سازی بین ۲ تا ۴۸ ساعت و توان آن بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلووات متفاوت بوده است. بیشترین کاربرد آن برای ذخیره سازی انرژی شبکهٔ سولار بوده است و استفاده در میکروگریدها. کاربردهای مورد استفاده عبارتند از ذخیره سازی انرژی برای استفاده در ساعاتی که آفتاب نیست؛ Capacity Firming، Electricity Energy Time Shifting، انتقال در زمینهٔ کاربردهای مسکونی و شبیه آنها. این نوع از فناوری در حال حاضر در حرکت بسمتی است که می تواند آیندهٔ خوبی را بخود اختصاص دهد چراکه هر ۶ تای این پروژه ها در حال حاضر آغاز شده اند و قرارداد آنها بسته شده است. عمر متوسط آنها ۳۰ سال می باشد و سرمایه گذاری آنها در حدود چند صد هزار دلار می باشد. باتوجه به وجود منابع کافی در این زمینه در کشور می توان در این زمینه و فناوریهای مشابه مبتنی بر فلزاتی که در ایران بوفور یافت می شوند سرمایه گذاری کرد و آنها مورد استفاده قرار داد. بنابراین این زمینهٔ فناوری بطور کلی تحت عنوان باتریهای فلز–هوا لازمست در سند مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۳-۳- باتریهای پایه نیکلی[۱]:

باتریهای پایه نیکلی بطور کلی دارای سه دسته می باشند که عبارتند از: باتریهای نیکل–آهن، باتریهای نیکل–کادمیم و باتریهای نیکل–هیدرید فلزی. لازم بذکر است بین این سه دسته، باتریهای نیکل_اهن که به باتریهای ادیسون موسومند از دیرباز مورد استفاده در صنایع سنگین مانند حمل و نقل ریلی بودند که بمرور جایگزین شده اند. باتریهای نیکل–کادمیم نیز بخاطر فلز سمس و سرطانزای کادمیم دارای منع خرید و فروش و تولید و مصرف می باشند و بهمین دلیل طی سالیان گذشته با انواع دیگری از باتریها جایگزین شده اند و باعث شده است تا باتریهای ادیسون مجدداً جای آنها را بگیرند [۱۰]. تعداد ۷ پروژهٔ ذخیره سازی برای صنعت برق با استفاده از باتریهای نیکلی در دنیا انجام شده است که در ۳ تا از آنها باتریهای نیکل–کادمیم، ۳ تا باتریهای ادیسون و یکی باتری نیکل–هیدرید فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. کاربرد آنها اغلب برای تأمین ۲۴ ساعتهٔ توان برای پنلهای خورشیدی بوده است و ظرفیت آنها هم از ۱۷ تا ۲۷۰۰۰ کیلووات متغیر بوده است. امریکا بیشترین مصرف کنندهٔ این فناوری در دنیا بوده است. همانطور که در بخشهای قبلی مربوط به این فناوری نیز اشاره شده است، فناوری نیکل–کادمیم در حال منسوخ شدن است و کار بر روی آن اصلاً منطقی نیست. فناوری نیکل–هدیرید فلزی نیز بسبب کاهش قیمت باتریهای لیتیمی بسمت جایگزینی توسط این نوع از باتریها هستند و حتی در خودروهای برقی نیز از آنها کمتر استفاده می شود و کاربرد آنها در حال محدود شدن به کاربردهای سبک می باشد. باتریهای ادیسون نیز بطور کلی بازار بسیار محدودی دارند و از نظر بازار و فناوری سرمایه گذاری روی آنها معقول بنظر نمی رسد. بنابراین لازمست تا در سند مربوطه با توجه باینکه تابحال تولید انواع باتریهای نیکلی را در داخل

[۱] Nickel-based Batteries

کشور نداشته ایم و مصرف مورد نیاز تاکنون از خارج تأمین میشده است (که اغلب از نوع نیکل–کادمیم است)، بهتر است بسمت جایگزینی آنها با فناوریهایی که قابل استفاده در داخل هست حرکت کرد و از تمرکز بر روی این نوع از فناوری خودداری کرد.

۲-۳-۴- باتریهای پایه سدیمی[۱]:

- **باتریهای سدیم-یون:**

یکی از جدیدترین انواع باتریها می باشند که عمر سیکلی بسیار خوبی داشته و به نسبت دارای ظرفیت بالایی می باشند. این دسته از باتریها هنوز در بازار مصرف جای خود را باز نکرده اند. روال کلی کار آنها شبیه به فناوری لیتیمی بوده ولی از نظر پارامترهای باتری از آن ضعیفتر است[۳۲]. شرکت امریکایی Energy Aquion تنها تولید کنندهٔ این نوع از باتری می باشد که در حال حاضر بیشتر بر پروژه های دارای فاند و با کاربرد محدود فعالیت دارد. این شرکت ۸ پروژه در امریکا و ۱ پروژه در آلمان و ۱ پروژه هم در پورتوریکو انجام داده است. ظرفیت توان آن در حدود چند ده کیلووات برای ۴–۱۰ ساعت بوده و اغلب برای کاربردهای تجدیدپذیر مورد استفاده قرار داشته است که بیشتر پنلهای خورشیدی می باشد. استفاده از آنها در میکروگریدها و در اختیار داشتن برق شبانه روزی از جملهٔ کاربردهیا آنها محسوب می شود. این نوع از فناوری در واقع مشتق از فناوری یون–لیتیم بوده است. نه فقط این فناوری که فناوریهای یون–منیزیم و یون–آلومینیوم نیز بسیار مورد توجه قرار گرفته اند اما تاکنون دارای خروجی صنعتی نبوده اند. بطور کلی چون در این فناوریهای روش ساخت و تولید یکسان می باشد، می توان بر روی تمامی فناوریهای فلز–یون کار کرد؛ البته باید توجه داشت کدامیک برای داخل کشور استراتژیک تر می باشد.

- **باتریهای سدیم-کلرید نیکل:**

این فناوری نیز مورد توجه بسیاری قرار داشته است و بیش از ۳۰ پروژه با استفاده از این فناوری انجام شده است. دو شرکت اصلی تأمین کنندهٔ این فناوری در دنیا FIAMMکرهٔ جنوبی و GE Energy Storage امریکا می باشند. ایتالیا و امریکا مشتریان اصلی این فناوری هستند. کاربرد اصلی این نوع از ذخیره سازی برای سیستمهای انرژی تجدیدپذیر شامل فتوولتائیک و بادی می باشد. برای توزیع و مدیریت مصرف برق نیز بسیار مورد استفاده قرار گرفته اند بخصوص برای میکروگریدها. پیک سایی، کنترل نوسانات و تعدیل فرکانس و برای انواع کاربردهای نظامی و کمپهای مربوطه مورد استفاده قرار دارند. عمر آنها حداکثر ۱۵ سال است و بیشتر پروژه ها در بازهٔ سالهای ۲۰۱۰–۲۰۱۷ انجام شده است. علیرغم کاربردهای نسبتاً زیاد آن، باتوجه به انحصاری بودن فناوری و گسترش روزافزون باتریهای دیگر مانند باتریهای لیتیمی، خیلی علاقمندی و جذابیت برای استفاده در ایران نخواهد داشت و بنظر بهتر است در اهداف سند مد نظر قرار نگیرد.

[۱] Sodium-based Batteries

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

- **باتریهای سدیم-گوگرد:**

این نوع از باتریها بسیار قدیمی بودند و تنها تولید کنندهٔ اصلی آن شرکت NGK Insulators ژاپن می باشد. بیشترین کاربرد این نوع از باتریها برای توزیع و مصارف مربوطه می باشد و دارای توان بالایی به نسبت دیگر انواع باتریهای قابل شارژ می باشد. ۱۴ پروژه از این باتری در ژاپن انجام شده است و ۱۲ پروژه در امریکا. حدود ۹ پروژهٔ دیگر در کشورهایی مثل ایتالیا و آلمان و فرانسه و کانادا مورد استفاده قرار گرفته اند. ظرفیتهای آنها در حدود چند مگاوات می باشد عمدتاً و قابلیت ذخیره سازی انرژی تا ۸ ساعت را می باشند. به سبب شرایط ویژه در کاربردهایی که امکان آتش سوزی در آنها وجود دارد قابل استفاده نیستند. عمر آنها ۲۰ سال بوده و معمولاً حجم سرمایه گذاری آنها چند میلیون دلاری می باشد[۳۳]. این فناوری به سبب انحصاری بودن خیلی مورد توجه برای ایران نمی باشد و بنظر پتانسیل سرمایه گذاری در بلند مدت ندارد. در این زمینه باید توجه داشت زیرساختها برای توسعهٔ چنین فناوریهایی فراهم نمی باشد.

۲-۳-۵- باتریهای سیالی[۱]:

باتریهایی که در آنها از سیالات فعال الکتروشیمیایی استفاده می شود مفهومی نسبتاً جدید هستند که بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. بدلیل نوع مواد مورد استفاده در آنها و همچنین سهولت در کاربا آنها، سرعت شارژ و دشارژ آنها بسیار بالا بوده و بسیار هم ارزان قیمت می باشند و برای اهداف صنعت برق می توانند بسیار مورد استفاده قرار گیرند. دو فناوری مهمتر در این زمینه فناوریهای وانادیم-ردوکس و روی-برم می باشند[۲۴]. فناوری روی-برم با ۳۱ پروژه و فناوری وانادیم با ۶۵ پروژه در صدر انواع فناوریهای باتریهای سیال هستند. در فناوری روی-برم دو شرکت مطرح امریکایی بنامهای Primus Power (Vionx Energy) و EnSync Energy Systems (ZBB Energy) هستند که عملاً همکاری با آنها ممکن نمی باشد. بغیر از اینها تنها یک شرکت استرالیایی بنام RedFlow هست که محصولاتی در این زمینه تولید می کند. بیشترین کاربرد این فناوری برای ذخیره سازی انرژیهای تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک یا بادی می باشد. توان مورد استفاده بطوریست که اغلب برای مناطق مسکونی و غیر مسکونی قابل استفاده می باشدو کاربردهای بسیار متنوعی را در صنعت توزیع برق شامل می شود. سهم امریکا و استرالیا از این ۳۱ پروژه بترتیب ۱۸ و ۹ پروژه می باشد.

در مورد فناوری وانادیم ردوکس فعالیت بسیار بیشتر انجام شده است و چین با داشتن ۱۲ پروژه در این زمینه یکی از فعالان اصلی در این فناوری می باشد. عمدهٔ فعالیت توسط شرکتهای Prudent Energy Corp و Rongke Power انجام شده است که هر دو چینی هستند. آلمان، ژاپن، استرالیا، ایتالیا، انگلیس، کرهٔ جنوبی، کانادا و امریکا از دیگر استفاده کنندگان از این فناوری می باشند. در آلمان شرکت Gildemeister، در ژاپن Sumitomo Electric Industries، در انگلیس redT، در کرهٔ جنوبی H2 Inc و در امریکا Imergy در این زمینه

[۱] Flow Batteries

پیشرو می باشند. کاربردهای این فناوری بسیار متنوع و از ذخیره سازی انرژیهای تجدیدپذیر مانند باد و فتوولتائیک تا استفاده در شبکهٔ تولید و توزیع می باشد. اغلب پروژه ها بعد از سال ۲۰۱۰ بوده و ظرفیتهای مختلفی از چند ده کیلووات تا ۲۰۰ هزار کیلووات (در چین) را شامل می شود.

علاوه بر این دو فناوری پیشرو، فناوریهای دیگری در این زمینه وجود دارند که عبارتند از: روی–اکسید نیکل، آهن–کروم، هیدروژن–برم (توسط اسرائیل توسعه داده شده است و ادعا شده است ۹۵٪ ارزانتر از انواع دیگر باتریهاست و چگالی انرژی ۳ برابر بیشتر دارد) و روی–آهن (توسعه داده شده توسط شرکت ViZn امریکا) که در مورد آخری ۴ پروژه در امریکا انجام شده است که اغلب همگی مربوط به ذخیره سازی انرژیهای تجدیدپذیر و مسائل ذخیره سازی و مصرف آنها و همچنین اتصال آنها به شبکه و ساپورت شبکهٔ توزیع م مصرف و پیک سایی و پایداری شبکه و شبیه آنها می باشد.

این نوع از فناوری به نسبت دیگر انواع باتری برای توسعه در داخل از کشور بسیار مناسب و سریع می باشد و شرکتها و گروههای تحقیقاتی می توانند به سبب نیاز به امکانات تولیدی کمتر، سریعتر وارد آن شوند و در آن فعالیت کنند بخصوص اینکه حجم استفاده آن در آینده بسیار بیشتر خواهد شد. فقط باید توجه داشت تا دو نکتهٔ مهم از الان در این زمینه در نظر گرفته شود: اول وجود مواد اولیهٔ مورد نیاز در داخل کشور و دوم مسائل زیست محیطی که هم اکنون صنعت باتریهای جریان سیال با آن به سبب استفاده از مواد سمی حاوی برم و فلزات سنگین و سرطانزا مثل کروم و وانادیم و نیکل درگیر هستند.

۲–۳–۶– باتریهای سرب–اسید[۱]:

این نوع از باتریها اولین نوع از باتریها می باشند که بیشترین کاربرد را در صنعت حمل و نقل برای استارتر ماشینها بخود اختصاص داده اند. انواع جدیدی از باتریهای سرب–اسید به مرور معرفی شده اند که عمر بالاتر و پارامترهای فنی بسیار بهتری به انواع اولیه دارند. یکی از مزایای اصلی این نوع از باتریها قیمت پایین آنها می باشد که برای کاربردهای کوچک و مصرف کننده مقرون به صرفه می باشد[۳۰]. بهمین دلیل است که این نوع باتریها بطور بسیار گسترده ای برای UPS ها از قدیم مورد استفاده بوده اند اما در صنعت برق بطور مستقیم کاربرد زیادی نداشته اند و اخیراً انواع VRLA و پیشرفتهٔ آنها مانند AGM و ژل برای کاربردهای تجدیدپذیر و شبکهٔ توزیع و اطمینان از پایداری شبکه مورد استفاده قرار گرفته اند. قابلیت این باتریها آنقدر زیاد است که در این مقال نگنجیده و همین بس که شرکتهای بسیار زیادی در ایران در حال تولید این نوع از باتریها می باشند. برای بکارگیری این ظرفیت نیاز به توسعهٔ تحقیقاتی و پژوهشی بطور جدی نیست و فقط

[۱] Lead-acid batteries

لازمست تا طی پروژه هایی مشکلات شرکتها و صنعت در این زمینه برطرف شود و از آنها برای شرکت در پروژه های پایلوت برای ذخیره سازیهای خارج از شبکه، مجتمعها، کارخانه ها، نیورگاه های تجدیدپذیر استفاده شود تا بدین ترتیب بتوانند این صنعت را بیش از پیش توسعه دهند.

۲-۳-۷- باتریهای لیتیمی[۱]:

بیشترین تعدا پروژه ها ذخیره سازی دردنیا به این فناوری باتری اختصاص دارد. توضیح از این فناوری فرصتی جدا و به بحثی مجزا اختصاص دارد. اما بصورت خلاصه باید گفت این فناوری حداقل طی ۱۵ سال آینده هیچ رقیب جدی نداشته و تمامی بهبودها بر روی این فناوری بیش از هرفناوری دیگری انجام خواهد شد. در این زمینه انواع بسیار متنوع و جدیدی از مواد الکترودی و بهینه سازیهایی که منجر به افزایش عمر باتریهای لیتیمی به بیش از ۲۰ سال شده است و عمر سیکلی آنها را تا چند ده هزار سیکل افزایش داده است، مورد ارزیابی قرار گرفته اند[۲۹ و ۳۲-۳۴]. این باتریها در حال حاضر بیشترین سهم از بازار باتریهای قابل شارژ را بخود اختصاص داده اند و کشور امریکا و بسیاری از کشورهای اروپایی علیرغم نداشتن مواد اولیه برای این نوع از باتریها بسمت توسعهٔ آنها قدم برداشته اند و امریکا طی برنامهٔ بسیار سنگین ۲/۱ میلیارد دلاری در سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳توانست خود را بسرعت به کشوری پیشرو در این زمینه تبدیل کند. درحال حاضر امریکا با داشتن بیشترین پتنتهای ثبت شدهٍبیشترین هزینهٔ R&D، بیشترین شرکتهای ثبت شدهٔ دانش بنیان و سهم بالا از بازار باتریهای لیتیمی، قویترین و اصلی ترین بازیگر این صنعت بشمار می رود بطوریکه بسیاری از شرکتهای ژاپنی صاحب نظر در این زمینه در حال رقابت بسیار جدی با تولید کنندگان این باتریها در امریکا هستند. ورود باین صنعت بدون شک برای ایران بسیار ضروری است بخصوص اینکه این باتریها در صنایع بسیار مختلف و متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است که از انرژیهای تجدیدپذیر گرفته تا خودروهای الکتریکی همگی بیشترین مصرف کنندهٔ این نوع از باتریها می باشند. شرایط تولید این نوع از باتریها درگیر مسائل بسیار مختلفی است. سرمایه گذاری در تولید این نوع از باتریها بسیار زیاد می باشد و باتوجه به شرایط کنونی بسیار دشوار است. شرکت باتریسازی نیرو چند سالی است به این فناوری ورود پیدا کرده است اما هنوز نتوانسته است تا سهم عمده ای از بازار مصرفی را بخود اختصاص دهد و دلیل این امر نبود تحقیق و پژوهش و زنجیرهٔ تأمین مواد و منابع و فناوری در این صنعت می باشد. باید توجه داشت که در هر صنعتی لازمست تا زنجیرهٔ ارزش بطور کامل شناسایی و بررسی شود. در صورتیکه نقاط مبهم و تنگناهایی در زنجیرهٔ ارزش وجود داشه باشد، لازمست تا بیشترین حجم از سرمایه گذاری را بخود اختصاص دهد. باتریهای لیتیمی در دوران پیشرفت خود قرار دارند و گروههای بسیار زیادی در سراسر دنیا بر روی آن کارهای تحقیقاتی

[۱] Lithium Batteries

انجام می دهند. پس لازمست در صورتیکه باین فناوری ورود شود، حجم تحقیق و پژوهش بسیار بالایی بدان اختصاص داد. ثبت پتنتها در این زمینه بسیار بیشتر از دیگر انواع فناوری باتری بوده و باعث شده است تا درحال حاضر شرکتهای مبتکر و خلاق در این زمینه بدنبال تولید محصول توسط خود باشند تا اینکه به کشورهای دیگر این فناوری را بفروش برسانند. در عین حال باید توجه داشت که ریسکهای اقتصادی بالا در داخل باعث شده است تا این صنعت بدلیل حجم سرمایه گذاری بسیار بالا مورد توجه جدی قرار نگیرد و باعث شود تا فاصلهٔ فناورانه هر روز بیشتر از پیش شود. از طرفی متأسفانه صنعتگران و فعالان صنعتی نمی دانند که خط تولید این نوع از باتری منحصر به فناوری لیتیمی نبوده و برای بسیاری دیگر از فناوریها در آینده نیز قابل استفاده است که عبارتند از انواع باتریهای فلز–یون و فلز–هوا و سرمایه گذاری در این زمینه برای آینده بسیار منطقی تر از دیگر انواع ذخیره سازهای انرژی و باتریها می باشد. در برنامهٔ ارائه شده در انتهای این گزارش مشخص شده است که طی چه روشی باید باین مهم دست یافت.

۲–۳–۸– باتریهای نوین:

باتری صنعتی است که بطور پیوسته در حال معرفی جایگزینهای بیشتر می باشد. برطبق تفسیری بیان شده است که صنعت باتری لیتیمی بخصوص مانند حرکت بر روی تردمیل است که اگر فقط یک لحظه توقف صورت گیرد، این صنعت و بازار آن زمین خواهد خورد و شرکت فعال ورشکسته خواهد شد. چنین شرایطی برای انواع دیگر ذخیره سازهای انرژی نیز وجود دارد. باتریهای نوین دیگری امکان دارد در آینده معرفی و مورد استفاده قرار گیرند که بهتر است قبل از اینکه بقیهٔ کشورها در این زمینه فعال شوند در این زمینه ها وارد شد و بر روی آنها تحقیقات و توسعه را آغاز کرد. برای مثال باتریهای لیتیم–سولفور حدود ۳۰ سال است که مورد تحقیق قرار دارد اما هنوز محصول آن بطور رسمی وارد بازار نشده است و اگر وارد بازار شود، قطعاً بسیاری از شرکتهای فعال در زمینهٔ باتریهای یون–لیتیم ورشکست خواهند شد. از طرفی باید توجه داشت که برطبق معیارهای ارائه شده در بخش ۳، بنوعی در گسترش این فناوری حرکت کرد که با کمترین هزینه بیشترین عایدی برای کشور بهمراه داشته باشد. لذا لازمست به منابع کنونی، وضعیت اقتصادی، اولویتها، آیندهٔ تأمین برق و انرژی، مسائل مربوط به محیط زیست، آب، توسعهٔ پایدار،اشتغالزایی و شبیه آنها بسیار توجه شود. بنابراین لازمست تا محققان بطوری جهت گیری شوند که بسمت برآورده شدن این موارد بر روی تحقیقات خود تمرکز کنند[۳۳].

۲–۳–۹– فلایویل

فلایویلها نیز دارای گسترهٔ مصرفی زیادی می باشند و می توان از آنها بعنوان یک ذخیره کنندهٔ انرژی مطمئن استفاده کرد که بیشتر برای تنظیم فرکانس شبکه قابل استفاده هستند. برای بررسی ذخیره سازهای انرژی لازمست به موارد متعددی توجه شود[۲۱]. برای مثال در سند

ذکر شده است که این فناوری از خارج از کشور تهیه شود درحالی‌که در بین حدود ۵۵ پروژهٔ ذخیره سازی انرژی با استفاده از فلایویل‌ها، ۲۱ پروژه توسط دو شرکت امریکایی Beacon Power و VYCON انجام شده است که عملاً خارج از دسترس ما برای همکاری می باشند. شرکت مطرح دیگر در این زمینه نیز AMBER می باشد که مجدداً آمریکایی بوده و عملاً امکان همکاری با آنها فراهم نمیباشد. یکی دیگر از شرکتهای فعال در این زمینه ABB می باشد که در سوئیس واقع است و ۹ پروژه در این زمینه انجام داده است. دیگر پروژه ها اکثراً محدود به مکانهای علمی و تحقیقاتی شده که نیازمند توان بسیار بالایی برای کاربردهای تحقیقاتی خود همانند فوزیون می باشند. ۲۸ پروژه مجموعاً در آمریکا انجام شده است. شرکت Temporal Power کانادا نیز ۵ پروژه انجام داده است که مجدداً بدلیل شرایط تحریمی کار با آنها مقدور نمی باشد. بنابراین باتوجه به محدودیتهایی که برای انتقال فناوری در کوتاه مدت و میان مدت (حداقل طی ۵ سال آینده از تاریخ نگارش این گزارش) امکان انتقال فناوری فراهم نمی باشد. از طرف دیگر این نوع از ذخیره سازها بیشتر در کاربرد شبکه در جایی مورد استفاده قرار می گیرند که یا به توان بسیار بالاتری نسبت به آنچه شبکه تأمین می کند نیاز دارد یا اینکه نوسانات برق را در تولیدات تجدیدپذیر یا غیرتجدیدپذیر از شبکه جذب کند. بنظر سرمایه گذاری در این فناوری در بلند مدت حداقل منطقی نمی باشد و باتوجه به فناوری پیچیدهٔ آن در مورد انواع دور و توان بالا، دسترسی بدان براحتی میسر نمی باشد. بعلاوه، درحال حاضر مورد نیاز شبکهٔ برق نبوده و بهتر است تا از اولویتهای کشور در کوتاه مدت کنار گذاشته شود.

۲-۴- سیستم‌های ذخیره‌سازی در دنیا

همانگونه که پیشتر مطرح شد نزدیک به ۹۵ درصد سیستم‌های ذخیره‌سازی در دنیا مربوط به سیستم‌های تلمبه ذخیره‌ای است که با توجه به محدودیت‌های مربوط به مکان برای توسعه دارای محدودیت‌هایی است. در ادامه به بررسی سیستم‌های ذخیره‌سازی موجود در دنیا برای باتری‌های لیتیومی، جریانی، CAES، و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است[۳۴-۳۷]. باتری‌ها لیتیومی در حدود ۵۶۰۰ مگاوات ساعت ظرفیت در دنیا نصب شده است

جدول ۲-۲- ظرفیت ذخیره‌سازی باتری لیتیومی در دنیا

Name	Capacity			Country	Installation Place	Year
	MWh	MW	h			
Moss Landing Energy Storage Facility	1,200	300	4	United States	Moss Landing, California	2020

McCoy Solar Energy Project	920	230	4	United States	Blythe, California	2021
Elkhorn Battery	730	182.5	4	United States	California	2022
Alamitos Energy Center	400	100	4	United States	Long Beach	2021
Saticoy BESS	400	100	4	United States	Saticoy	2021
Minety Battery Energy Storage Project	266	150	-	United Kingdom	Minety	2021
Gateway Energy Storage	230	230	1	United States	Otay Mesa, California	2020
Gambit battery storage project	200	100	2	United States	Angleton, Texas	2021
Kunshan Energy Storage Power Station	194	111	-	China	Kunshan	2020
Hornsdale Power Reserve	193.5	150		Australia	South Australia, Jamestown	2017
Korea Zinc Energy Storage System	150	32.5		South Korea	Ulsan	2018
Escondido Substation	120	30	4	United States	Escondido	2017
Bat Cave battery storage project	100	100	1	United States	Texas	2021
North Fork battery storage project	100	100	1	United States	Texas	2021
Pomona Substation	80	20	4	United States	Pomona	2017
Mira Loma Substation	80	20	4	United States	Mira Loma	2017
Stocking Pelham	50	50	1	United Kingdom	Stocking Pelham	2018
Jardelund	50	48	1	Germany	Jardelund	2018
Minamisōma Substation	40	40	1	Japan	Minamisōma	2016

National Wind and Solar Energy Storage and Transmission Demonstration Project (I)	36	6	6	China	Hebei, Zhangbei	-
Ruien Energy storage	32	25	1.2	Belgium	Ruien	-
Tehachapi Energy Storage Project	32	8	4	United States	California, Tehachapi	2014

باتری‌های سدیم سولفور نصب شده در دنیا ۵۴۵ مگاوات ساعت است که هر دو سیستم در ژاپن احداث شده است که در جدول ۲-۳ مشخصات آن ارائه شده است.

جدول ۲-۳- ظرفیت ذخیره‌سازی باتری سدیم سولفور در دنیا

Name	**Capacity**			**Country**	**Installation Place**	**Year**
	MWh	**MW**	**h**			
Buzen Substation	300	50	6	Japan	Buzen	2016
Rokkasho Aomari	245	34	7	Japan	Rokkasho	2008

کل باتری‌های جریانی نصب شده در دنیا ۹۳۵ مگاوات ساعت است که لیست آن در جدول ۲-۴ ارائه شده است. برای سیستم‌های CAES ظرفیت ذخیره‌سازی در حدود ۳۸۰۰ مگاوات ساعت است که در سال‌های گذشته در آلمان و آمریکا نصب شده است که جزئیات آن در جدول ۲-۵ ارائه شده است.

جدول ۲-۴- ظرفیت ذخیره‌سازی باتری جریانی در دنیا

Name	**Capacity**			**Country**	**Installation Place**	**Year**
	MWh	**MW**	**h**			
Primus Power Modesto Wind Firming Energy Farm	75	25	3	United States	California, Modesto	

Hokkaido Battery Storage Project (provisional name)	60	15		Japan	Hokkaido	2015
Dalian VFB - UET / Rongke Power	800	200	4	China	Liaoning, Dalian	2021

برای سیستم‌های CAES ظرفیت ذخیره‌سازی در حدود ۳۸۰۰ مگاوات ساعت است که در سال‌های گذشته در آلمان و آمریکا نصب شده است.

جدول ۲-۵ . سیستم‌های ذخیره‌سازی نصب شده با روش CAES

Name	**Capacity**			**Country**	**Installation Place**	**Year**
	MWh	**MW**	**h**			
McIntosh CAES Plant [de]	2,860	110	26	United States	Alabama, McIntosh	1991
Huntorf CAES Plant	870	290	3	Germany	Huntorf, Elsfleth	1978
Next Gen CAES using steel piping	40.5	9	4.5	United States	New York, Queens	

سیستم‌های ذخیره سازی حرارتی برابر است با ۱۰۷۱۶ مگاوات ساعت است که ۱۰۶۱۶ مگاوات ساعت آن ذخیره سازی حرارتی با نمک مذاب است. ۱۰۰ مگاوات ساعت هم ذخیره‌سازی بخار وجود دارد.

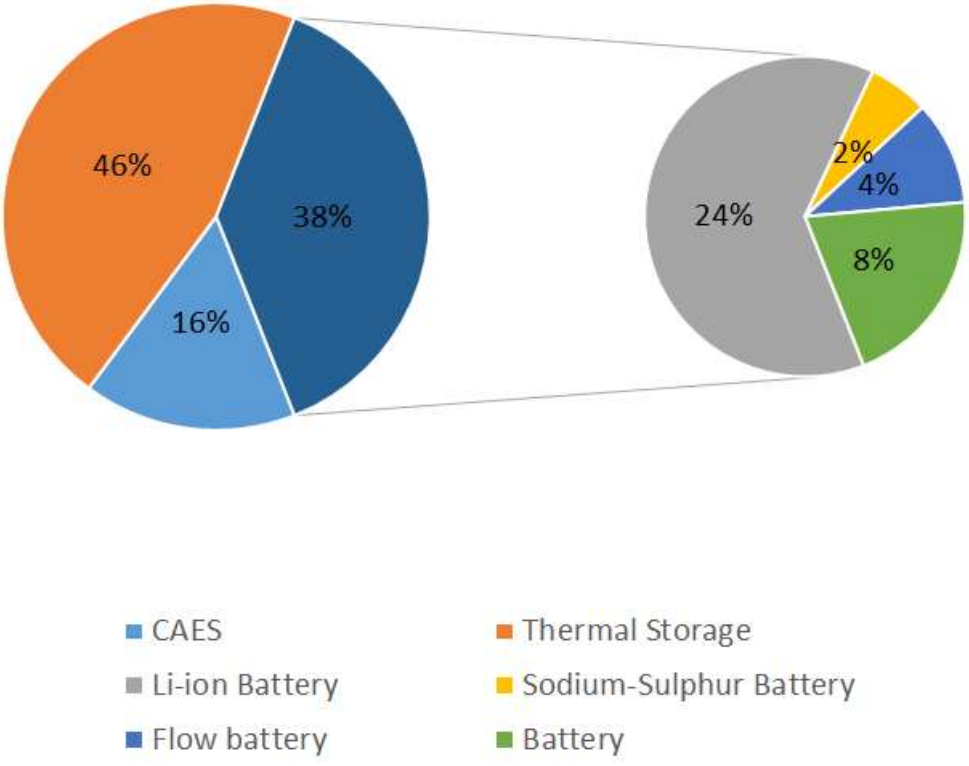
جدول ۲-۶ . سیستم‌های ذخیره‌سازی نصب شده حرارتی

Name	**Capacity**			**Country**	**Installation Place**	**Year**
	MWh	**MW**	**h**			
Ouarzazate Solar Power Station	3,005	510	3 / 7 / 7.5	Morocco	Ouarzazate	2018
Cerro Dominador Solar Thermal Plant	1,925	110	17.5	Chile	Antofagasta	2021
Solana Generating Station	1,680	280	6	United States	Arizona, Gila Bend	2013

Extresol Solar Power Station	1,125	150	7.5	Spain	Torre de Miguel Sesmero, Badajoz	2009
Crescent Dunes Solar Energy Project	1,100	110	10	United States	Tonopah, Nevada	2016
Andasol Solar Power Station	1,031	134.7	7.5	Spain	Granada, Guadix	2009
Bokpoort CSP	450	50	9	South Africa	Northern Cape Province, Globershoop	2015
KaXu Solar One	300	100	3	South Africa	Northern Cape Province, Pofadder	2015
Khi Solar One	100	50	2	South Africa	Northern Cape Province, Upington	2016

همچنین حدود ۱۸۳۰ سیستم ذخیره‌سازی باتری در دنیا وجود دارد که به صورت خاص از یک فناوری استفاده نشده است و از انواع باتری‌های نیکل–کادمیوم، سرب اسید و لیتیومی استفاده شده است.

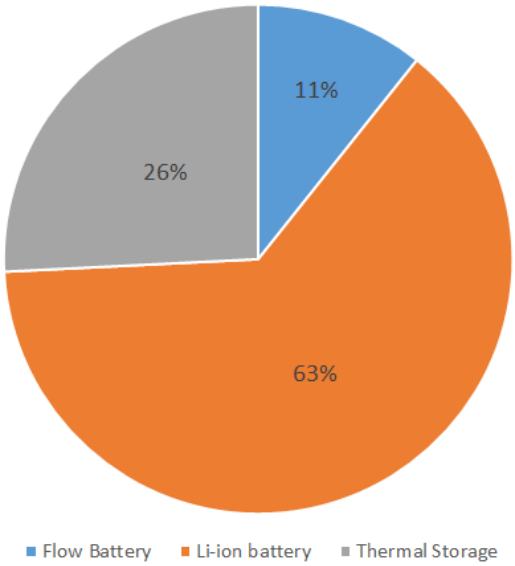
برر سی کل سیستم‌های ا صلی ذخیره سازی در دنیا بجز تلمبه برق–آبی ن شان می‌دهد که نزدیک به نیمی از سیستم‌های ذخیره سازی با ذخیره‌سازی حرارتی است. ۳۸ درصد این ذخیره‌سازی مربوط به باتری‌هاست که در حدود ۶۰ درصد این مقدار مربوط به باتری‌های لیتیومی است. نکته بسیار مهم دیگر روند توسعه این فناوری‌هاست



DOI: 10.30503/nripress.2020.167

شکل ۲-۵- نسبت سیستم‌های ذخیره‌سازی بجز PHES

از سال ۲۰۲۰ تا به امروز سیستم‌های نصب شده حاکی از افزایش روند توسعه باتری‌های لیتیومی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد بیش از ۶۰ درصد سیستم‌های جدید، مبتنی بر فناوری باتری‌های لیتیومی هستند و بعد از آن ذخیره‌سازی حرارتی و باتری‌های جریانی حضور دارند. لازم بذکر است در سال‌های اخیر سیستم ذخیره‌سازی غیر از این سیستم‌ها مطرح نشده است



شکل ۲-۶- سهم سیستم‌های ذخیره‌سازی نصب شده از سال ۲۰۲۰

۲-۵- هزینه‌های فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی

هنگام ارزیابی هزینه‌های فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی، چند پارامتر کلیدی باید در نظر گرفته شود. برخلاف فناوری‌های تولید برق، که هزینه‌های سرمایه معمولاً بر اساس حداکثر توان خروجی (یعنی دلار بر وات[۱]) با هزینه‌های سوخت که در هزینه انرژی تولیدشده (دلار بر واتساعت[۲]) نقش دارد، رتبه‌بندی می‌شوند. در سیستم‌های ذخیره انرژی، این هزینه‌ها هر دو به هزینه سرمایه نصب‌شده سیستم کمک می‌کنند.

[۱] $/W

[۲] Wh/$

فراتر از هزینه‌های سرمایه‌ای فناوری، در نظر گرفتن طول عمر سیستم[1]، زمان پاسخگویی سیستم، توان نامی سیستم و مدت‌زمانی که یک سیستم می‌تواند توان نامی را ارائه دهد. راندمان نیز یک نگرانی است، به‌ویژه اگر قیمت برق یا آلاینده‌های هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای از سیستم برق بالا باشد، اما ازآنجایی‌که هم هزینه و هم انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط با تولید برق کاهش می‌یابد، بازده نقش کمتری در هزینه کلی تحویل انرژی ذخیره‌شده ایفا می‌کند. درنهایت، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری نیز به هزینه کلی استفاده از فناوری‌های ذخیره‌سازی کمک می‌کند[۳ و ۳۴].

۲-۵-۱- توضیحات فناوری

از میان فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مکانیکی، هیدرولیک پمپاژ شده بیشترین استفاده را داشته است. سدهای برق‌آبی به مدت یک قرن به‌عنوان شکلی از ذخیره برق عمل کرده‌اند و از هیدرولیک پمپاژ شده برای متعادل کردن نیروگاه‌های هسته‌ای بزرگ استفاده‌شده است که بهترین عملکرد را در سطوح توان خروجی ثابت دارند. با استفاده از مکان‌های مساعد جغرافیایی، آب به مخزن بالایی پمپ می‌شود و انرژی پتانسیل آب پمپ شده می‌تواند برای چرخاندن یک توربین و تولید برق استفاده شود.

سایر گزینه‌های ذخیره‌سازی مکانیکی در مقیاس بزرگ شامل ذخیره‌سازی هوای فشرده و ذخیره‌سازی حرارتی است. سیستم‌های هوای فشرده اولیه به یک توربین گاز طبیعی در ارتباط با هوای فشرده متکی هستند. راندمان این توربین‌ها از توربین‌های معمولی بالاتر است، زیرا آن‌ها مجبور نیستند هوای فشرده برای فرآیند احتراق تولید کنند، اما این سیستم‌ها همچنان بر احتراق سوخت‌های فسیلی متکی هستند. تلاش‌های تحقیقاتی جدیدتر و پروژه‌های آزمایشی با پروژه‌های آزمایشی موفق در تگزاس و سوئیس تلاش کرده‌اند از انبساط هوای فشرده به‌تنهایی برای تولید برق استفاده کنند. ذخیره انرژی حرارتی اغلب با سیستم‌های انرژی خورشیدی متمرکز جفت می‌شود، که نمک مذاب را گرم می‌کند و سپس ذخیره می‌شود و برای تولید بخار در طول شب استفاده می‌شود. سیستم‌های خورشیدی متمرکز معمولاً در مکان‌های بسیار آفتابی قرار دارند، اما روش‌های دیگری مانند گرمایش مقاومتی، می‌تواند برای گرم کردن محیط ذخیره‌سازی انرژی مستقل از آرایه خورشیدی متمرکز اجرا شود. مبدل‌های حرارتی انرژی حرارتی را از محیط ذخیره‌سازی به آب جوش منتقل می‌کنند و سپس از آن برای چرخاندن توربین برای تولید برق استفاده می‌شود.

فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتروشیمیایی شامل باتری‌ها و پیل‌های سوختی است و انواع مختلفی از هر دو فناوری وجود دارد. برخلاف فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی مکانیکی، که همگی به توربین‌ها برای چرخش ژنراتورهای مغناطیسی متکی هستند، فناوری‌های ذخیره‌سازی

[1] که ناشی از برگشت‌ناپذیری‌ها و تلفات ذاتی سیستم است که در طول زمان انباشته می‌شود، به‌ویژه برای سیستم‌های الکتروشیمیایی.

الکتروشیمیایی از پیوندهای شیمیایی به‌عنوان مکانیسم ذخیره‌سازی استفاده می‌کنند. الکترودهای مثبت و منفی باتری‌ها می‌توانند هم جامد و هم مایع باشند. اگر الکترودها جامد هستند، یک الکترولیت مایع برای تسهیل انتقال یون لازم است، همان‌طور که در باتری‌های سرب اسیدی که بیش از ۱۵۰ سال است در دسترس هستند، و باتری‌های درونی مانند سلول‌های لیتیوم و سدیم یون که بسیار زیاد هستند، لازم است. جدیدتر هنگامی‌که هر دو الکترود مایع هستند، معمولاً جداکننده‌های غشایی برای جلوگیری از تلاقی بین واکنش‌دهنده‌ها وجود دارد، همان‌طور که در اکثر پیکربندی‌های باتری جریانی وجود دارد[۵ و ۳۵].

۲-۵-۲- -محرک‌های هزینه‌های فناوری

برای سیستم‌های ذخیره‌سازی مکانیکی در مقیاس بزرگ، هزینه تحت تأثیر جغرافیا قرار می‌گیرد. سیستم‌های آبی پمپی به مکان‌هایی مناسب برای مخزن ذخیره‌سازی و تغییر ارتفاع کافی برای تأمین انرژی بالقوه نیاز دارند. مانند آب پمپاژ شده، ذخیره انرژی هوای فشرده[۱] نیز به دلیل در دسترس بودن منابع طبیعی برای تأمین ذخیره‌سازی هوای کم‌هزینه محدودشده است. تشکیلات متداول برای ذخیره‌سازی زیرزمینی شامل غارهای نمک استخراج‌شده و سایر سازندهای سنگی متخلخل است. گزینه‌های ذخیره‌سازی زیرزمینی موردبررسی قرارگرفته‌اند، اما بسیار گران‌تر از استفاده از تأسیسات ذخیره‌سازی زیرزمینی موجود هستند و برای تبدیل‌شدن به تجاری قابل‌دوام با مشکل مواجه شده‌اند. اندازه منابع جغرافیایی، در ارتباط با اندازه توربین‌های نصب‌شده، بر نسبت کلی توان (انرژی سیستم) تأثیر می‌گذارد.

برخلاف سیستم‌های پمپ‌شده آبی و هوای فشرده، که در آن‌ها محیط ذخیره‌سازی به‌طور مؤثر رایگان است، یافتن مواد کم‌هزینه که گرما را حفظ می‌کنند برای سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی حیاتی است. اگرچه گرما را می‌توان مستقیماً به‌صورت بخار ذخیره کرد، اما رایج‌ترین انتخاب نمک‌های مذاب است که می‌توانند به دمای بالاتری دست یابند. سایر مواد ذخیره‌سازی حرارت معقول، مانند بتن و ماسه، بسیار کم‌هزینه هستند و پیشنهادشده‌اند اما به‌طور گسترده اجرانشده‌اند. هیدریدهای فلزی که با افزودن هیدروژن یک واکنش گرمازا دارند، پتانسیل رسیدن به دمای بالاتر از نمک‌های موجود را دارند اما درحال‌توسعه تحقیقاتی هستند.

ذخیره انرژی چرخ طیار[۲] برای هزاران سال به اشکال مختلف مورداستفاده قرارگرفته است، اما بیشتر کاربردهای جدیدتر آن‌ها چرخ‌های طیار پرسرعت بوده است که اغلب با پروژه‌های برق تجدیدپذیر جفت می‌شوند. راندمان رفت‌وبرگشت این سیستم‌ها می‌تواند بالا باشد، اگرچه

[۱] ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (CAES): یک فناوری ذخیره‌سازی انرژی است که انرژی را با فشرده‌سازی هوا به داخل یک محفظه ذخیره می‌کند و انرژی را با عبور هوا از داخل یک توربین، معمولاً همراه با احتراق گاز طبیعی، بازیابی می‌کند.

[2] Flywheel

نرخ‌های خود تخلیه نیز به اندازه‌ای بالا هستند که از ذخیره طولانی‌مدت انرژی جلوگیری کنند، زیرا اگر دستگاه با انرژی ذخیره‌شده باقی بماند، اصطکاک و سایر تلفات در طول زمان جمع می‌شوند. به دلیل این تلفات، هزینه به ازای هر کیلووات ساعت انرژی ذخیره‌شده بالا است و هزینه‌های ویژه توان نسبتاً پایین است. اگرچه این فناوری با افزایش تأسیسات برق تجدیدپذیر در اواسط تا اواخر دهه ۲۰۰۰ موفقیت اولیه را تجربه کرد، این صنعت در سال‌های اخیر با چالش‌هایی از سوی دیگر فناوری‌ها مواجه شده است.

به‌طور سنتی، خازن‌ها برای ذخیره مستقیم بار به مواد دی‌الکتریک متکی بودند، اما امروزه خازن‌های دولایه الکتروشیمیایی و شبه خازن‌ها بسیار رایج‌تر هستند. آن‌ها برای جداسازی یون‌های درون یک الکترولیت به الکترودهای باردار، که معمولاً از کربن ساخته‌شده‌اند، متکی هستند. ازآنجایی‌که این جداسازی در سطح الکترودها اتفاق می‌افتد (چه در تماس با الکترولیت یا با الکترود دیگر)، خازن‌ها در ارائه چگالی توان بالا عالی هستند، اما ظرفیت ذخیره انرژی آن‌ها محدود است. افزایش ضخامت الکترود منجر به مقدار بیشتری از انرژی ذخیره‌شده نمی‌شود. بنابراین، کاهش هزینه‌های الکترولیت و مواد اضافی الکترود برای به حداقل رساندن هزینه‌های سیستم مهم است.

اگرچه برخی از فناوری‌های باتری بیش از ۱۵۰ سال است که مورداستفاده قرار می‌گیرند، نوآوری‌های اخیر منجر به پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری و هزینه شده است. تا قبل از پیشرفت‌های تکنولوژیکی اخیر، باتری‌های اسید سرب متداول‌ترین فناوری ذخیره‌سازی الکتروشیمیایی با هزینه سرمایه نسبتاً پایین بودند، اما از راندمان و عمر مفید نسبتاً پایین رنج می‌برند و زمانی که به ۸۰ درصد ظرفیت ذخیره‌سازی اولیه خود می‌رسند بازنشسته می‌شوند. هزینه کم و در دسترس بودن آن‌ها را به انتخابی متداول برای ریزشبکه‌های خارج از شبکه و سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی + و سیستم‌های قدرت پشتیبان برای برنامه‌هایی مانند دکل‌های تلفن همراه تبدیل کرد، اما آن‌ها برای پیاده‌سازی گسترده در مقیاس شبکه بسیار گران بودند.

در مقابل، هزینه باتری‌های لیتیوم یونی از زمان معرفی تجاری آن‌ها در سال ۱۹۹۱ به‌شدت کاهش‌یافته است. باتری‌های لیتیوم یونی امروزی نسبت به باتری‌های سرب اسیدی، چگالی انرژی و انرژی ویژه بالاتری دارند. حوزه‌های فعلی تحقیقات بر بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی مواد الکترود مثبت و حذف مواد کربنی از الکترود منفی برای داشتن باتری لیتیوم–فلزی متمرکز است که تعادل سخت‌افزار سلول را کاهش می‌دهد. بهبود در مواد الکترولیت و سیستم‌های مدیریت باتری، عمر مفید باتری‌های لیتیوم یونی را افزایش داده است و می‌توان سیستم‌هایی طراحی کرد که باتری‌ها را تا زمانی که به ۶۰ درصد ظرفیت ذخیره‌سازی خود برسند، چرخه می‌دهند. باتری‌های لیتیوم یون تقریباً کاملاً پاسخگو هستند، که تا حدی توسط بازار خودروهای الکتریکی هدایت می‌شود، جایی که چگالی توان یک ویژگی بسیار ارزشمند است. ازآنجایی‌که توان و چگالی انرژی در سلول‌های باتری جفت می‌شوند، این بدان معناست که باتری‌های لیتیوم یونی موجود در بازار برای کاربردهای طولانی‌تر گران هستند. باتری‌های یون سدیم به همان مکانیزم‌های شارژ و دشارژ مانند باتری‌های لیتیوم یون متکی هستند و از موادی استفاده می‌کنند که حتی فراوان‌تر هستند. بااین‌حال، مواد الکترود منفی تا حدودی محدود هستند، زیرا یون‌های سدیم بزرگ‌تر از یون‌های لیتیوم هستند، که همچنین با شارژ و تخلیه مکرر سلول، انبساط و انقباض مواد الکترود را افزایش می‌دهد. تخمین تعادل هزینه‌های سیستم

برای سیستم‌های ذخیره‌سازی یک حوزه تحقیقاتی مهم اما موردمطالعه قرار نگرفته است، با برآوردهای نسبتاً کمی از هزینه‌های سخت‌افزاری سیستم در دسترس است.

یک چالش برای هر دو باتری اسید سرب و باتری‌های درون‌یاب[۱]، جفت شدن انرژی و توان در سیستم باتری است. بیشتر طرح‌ها اقتباس‌هایی از باتری‌های خودرو بوده‌اند که به چگالی توان بالاتری نسبت به یک برنامه ذخیره‌سازی طولانی‌مدت نیاز دارند. باتری‌های جریان، که دارای مخازن ذخیره‌سازی واکنش‌دهنده‌ها و جداکننده‌های غشایی هستند، مسیری را برای جدا کردن اجزای باتری تبدیل نیرو و ذخیره انرژی ارائه می‌دهند. در عمل، سیستم‌های باتری جریان معمولاً برای کاربردهای ۴ تا ۶ ساعته (یا بیشتر) هدف قرار می‌گیرند، زیرا سیستم‌های پمپاژ یا سایر سیستم‌های گردش خون، پاسخ‌دهی و توانایی آن‌ها را برای ارائه خدمات شبکه با ارزش بالا محدود می‌کنند. ازآنجایی‌که واکنش‌دهنده‌های ردوکس[۲] بخش قابل‌توجهی از هزینه باتری‌های جریان هستند، بسیاری از ترکیبات یا واکنش‌های مختلف به‌عنوان واکنش‌دهنده در باتری‌های جریان استفاده‌شده‌اند، ازجمله روی–برم، آهن، کروم و وانادیوم. پیکربندی‌های جدیدتر از گرانش استفاده می‌کنند و برخی یا همه پمپ‌هایی را که همرفت بین واکنش‌دهنده‌ها را مجبور می‌کنند تا تعادل هزینه‌های سیستم را کاهش دهند، حذف می‌کنند، اما هنوز به‌طور گسترده تجاری نشده‌اند[۳ و ۵].

۲–۵–۳– - نحوه برآورد هزینه‌های آینده

با توجه به تغییر سریع در هزینه‌های فناوری ذخیره‌سازی انرژی و نقشی که ذخیره‌سازی انرژی ممکن است در شبکه برق آینده ایفا کند، علاقه‌ای به پیش‌بینی هزینه آینده این فناوری‌ها، به‌ویژه برای باتری‌ها وجود دارد. روش‌های متعددی برای انجام این پیش‌بینی‌ها استفاده شده است، ازجمله استفاده از تحلیل‌های آماری برای شناسایی نرخ‌های یادگیری در طول زمان، استخراج کارشناسان هزینه‌های فناوری آینده و مدل‌های هزینه فنی ورودی‌های فناوری و فرآیندهای تولید. روش‌ها اغلب بر اساس فناوری ذخیره‌سازی متفاوت هستند، با تمرکز جدیدترین تحقیقات بر روی فناوری‌های باتری که شاهد کاهش سریع هزینه‌ها بوده‌اند.

برای بسیاری از فن‌آوری‌های بالغ، مانند آب‌های پمپاژ شده، هم هزینه‌های سیستم و هم تأسیسات در سال‌های اخیر نسبتاً پایدار بوده‌اند و مطالعاتی که هزینه‌ها را در طول زمان بررسی می‌کنند، نشان داده‌اند که تأثیر قابل‌توجهی از یادگیری با انجام برای کاهش بیشتر هزینه‌ها وجود ندارد. هزینه‌ها نیز بسیار خاص سایت هستند و بسیاری از سودمندترین سایت‌ها قبلاً انتخاب‌شده‌اند. این امر به‌ویژه در مورد کشورهایی

---

[۱] intercalation

[۲] Redox

مانند ایالات‌متحده و ژاپن که قبلاً تأسیسات آبی پمپاژ بزرگی دارند صادق است. بسیاری از پروژه‌های اخیر ارتقاءیافته به تأسیسات برق‌آبی و پمپاژ آب از قبل موجود بوده‌اند. با توجه به تعداد محدود امکانات، مدل‌سازی هوای فشرده و سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی محدود بوده است و عمدتاً شامل مدل‌های هزینه فنی با استفاده از تحلیل‌های حساسیت هزینه‌های سرمایه، یا جایگزینی مواد با ارزش بالا برای ارزیابی پتانسیل کاهش هزینه‌های آینده است.

بسیاری از تحقیقات اخیر در مورد هزینه‌های فناوری ذخیره‌سازی انرژی در آینده بر هزینه باتری‌های لیتیوم یون متمرکزشده است. چندین مدل از داده‌های قیمت و تولید تاریخی برای برون‌یابی کاهش هزینه‌های آتی استفاده کرده‌اند یا استنباط‌های تخصصی را برای شناسایی هزینه‌های فناوری آینده و محرک‌های بالقوه هزینه‌های آتی انجام داده‌اند.

مدل‌های هزینه فنی پایین به بالا که طرح سلول نمونه را برای محاسبه پارامترهایی مانند ابعاد سلول، ضخامت الکترود و شیمی باتری تجزیه‌وتحلیل می‌کنند، نیز توسعه داده‌شده‌اند. برای طراحی سلول نمونه، این مدل‌ها سپس هزینه‌های ساخت، ازجمله هزینه‌های مواد ورودی، تجهیزات، نیروی کار، انرژی و سایر هزینه‌ها را تخمین می‌زنند. مدل BatPaC آزمایشگاه ملی آرگون سلول‌های کیسه‌ای مختلف را با ظرفیت‌های ذخیره‌سازی و مواد شیمیایی متفاوت می‌سازد. مدل هزینه بر برآورد هزینه برای یک کارخانه نماینده تکیه دارد و هزینه‌های تولید را نسبت به این حجم تولید نماینده بسته به نرخ تولید موردنظر مقیاس می‌کند. از تکرارهای این مدل برای بررسی اینکه چگونه کاهش مراحل ساخت با زمان فشرده مانند خیس کردن الکترود و تشکیل سلول می‌تواند هزینه کلی را کاهش دهد استفاده‌شده است. سایر مدل‌های مهندسی از تخمین‌های گسسته هزینه تجهیزات، نیروی کار و انرژی لازم برای تولید حجم تولید سالانه مشخص استفاده می کنند. فراتر از مدل‌ها، یک روش معمول صنعتی برای تخمین کف هزینه باتری‌های لیتیوم یونی، در نظر گرفتن هزینه‌های مواد خام لیتیوم کربنات، کبالت، نیکل، منگنز و غیره برای الکترودها و مواد الکترولیت در مقایسه با ظرفیت خاص مواد ذخیره‌سازی است.

مطالعات برای سایر مواد شیمیایی باتری کمتر پربار است. باتری‌های یون سدیم گهگاه در مدل‌های نرخ یادگیری مبتنی بر بازار گنجانده می‌شوند یا از مدل‌های هزینه فنی باتری‌های لیتیوم‌یونی با جایگزینی برای هزینه‌های مواد ورودی و ظرفیت‌های الکترود قرض گرفته می‌شوند. به‌طور مشابه، برخی از مواد شیمیایی باتری جریان در تحلیل‌های بازار ذخیره‌سازی گسترده‌تر نرخ یادگیری گنجانده‌شده‌اند. دیگران مدل‌های هزینه فنی از شیمی‌های مختلف باتری جریان و مطالعات متعددی را انجام داده‌اند و تلاش کرده‌اند تا هزینه آینده باتری‌های جریان را با تفکیک و تخمین هزینه‌های اجزای سیستم و مقایسه آن‌ها با هزینه‌های سیستم باتری لیتیوم یون مدل کنند.

هر یک از این مدل‌ها دارای نقاط قوت و ضعف هستند: مدل‌های نرخ یادگیری می‌توانند به‌طور مؤثر روندهای بازار را به تصویر بکشند، اما اطلاعات زیادی در مورد عوامل این هزینه‌ها ارائه نمی‌دهند. مطالعات استخراج خبره می‌تواند گرایش‌های تحقیقاتی و گرایش‌های خط‌مشی را شناسایی کند، اما کارشناسان همیشه هنگام تخمین هزینه‌های اجزا و سیستم‌ها برای فناوری‌های ذخیره‌سازی سازگار نیستند و شناسایی حوزه‌های تحقیقاتی به کارشناسان منتخب بستگی دارد. مدل‌های هزینه فنی می‌توانند به‌طور مؤثر فرآیندهای تولید، طراحی سلول‌ها و شیمی

باتری‌ها را مدل‌سازی کنند، اما قادر به پیش‌بینی تغییرات در شیمی سلولی جدید که در تحقیقات آینده کشف می‌شوند، نخواهند بود[۱۱ و ۳۳-۳۵].

۲-۵-۴- تعامل اقتصاد ذخیره‌سازی با قوانین و سیاست‌های بازار

یک زمینه کوچک‌تر اما مهم تحقیقاتی شامل بررسی کمی رابطه بین سیاست دولت یا قوانین بازار و عملیات ذخیره‌سازی و اقتصاد است. جامعه ذخیره‌سازی انرژی دارای سیاست‌ها و موانع بازار برای ذخیره‌سازی انرژی است. به‌عنوان یک طبقه دارایی، به‌طور واضح در دسته‌های موجود قرار نمی‌گیرد و به طرز ناخوشایندی هم به‌عنوان تولید و مصرف و هم به‌عنوان پل‌هایی در بازارهای عمده‌فروشی و توزیع عمل می‌کند. اگرچه اهمیت کیفی قوانین بازار برای ذخیره‌سازی درک شده است، پشتیبانی تحلیلی لازم با تأخیر مواجه شده است.

در تحقیقی از یک مدل مبتنی بر PLEXOS از شبکه برق ایرلند استفاده شد تا بررسی شود که چگونه تغییر قوانین بازار ممکن است بر اقتصاد CAES برای تکمیل تولید باد تأثیر بگذارد. تغییر به بازار واحد یکپارچه برق در ایرلند، هزینه عدم قطعیت پیش‌بینی باد را برای ژنراتورهای بادی درونی کرد، جایی که قبلاً به‌عنوان هزینه سیستم در همه شرکت‌کنندگان در نظر گرفته می‌شد. آن‌ها دریافتند که افزودن ذخیره‌سازی تحت شرایط جدید بازار باید با کاهش میانگین قیمت برق به نفع مصرف‌کنندگان باشد، اما دوره بازگشت تولیدات بادی را اندکی افزایش می‌دهد. در تحقیقی دیگر پس از اجرای دستورات ۷۵۵ و ۷۸۴ کمیسیون تنظیم مقررات انرژی فدرال که اپراتورهای سیستم را به ارائه پرداخت برای عملکرد و جبران سرعت و سرعت به شرکت‌کنندگان هدایت می‌کند، درآمد یک نیروگاه ذخیره انرژی چرخ طیار را در PJM در نظر بگیرید. یک مدل ذخیره‌سازی هیدرولیک پمپ شده دقیق ایجاد کرده و آن را برای یک مشکل حداکثر سازی درآمد تحت قوانین بازار MISO و ISO نیوانگلندی[۱] اعمال می‌کردند. آن‌ها دریافتند که قوانین بازار ISO نیوانگلندی به ذخیره‌سازی پاداش متفاوتی می‌دهد که منجر به تقریباً دو برابر درآمد می‌شود و الگوهای عملیاتی متفاوتی را از یک ذخیره‌سازی حداکثر سود ایجاد می‌کند[۲۳].

۲-۵-۵- چالش‌ها و مسائل برجسته در اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی

اگرچه حوزه اقتصاد ذخیره انرژی به‌سرعت رشد کرده است، راه‌های امیدوارکننده‌ای برای توسعه بیشتر وجود دارد. ما چندین مورد را در این بخش برجسته می‌کنیم و اگر مسیرهای تحقیقاتی مهم دیگری وجود دارد که پیش‌بینی نکرده‌ایم، از خوانندگان آینده پوزش می‌خواهیم.

[۱] ISO New England

واضح‌ترین مسئله برجسته برای دست‌اندرکاران تحلیل اقتصادی ذخیره‌سازی ممکن است عدم استانداردسازی و چالش کاربرد کلی مدل‌های ذخیره‌سازی باشد. همان‌طور که خواننده در سراسر این مقاله مشاهده کرده است، روش‌های زیادی برای پرسش‌های مربوط به اقتصاد ذخیره‌سازی به کار گرفته‌شده‌اند که هر مطالعه موردی ابزار تحلیلی جدیدی را ایجاد می‌کند. اگرچه این مجموعه از ادبیات، گستردگی بینش در این زمینه را نشان می‌دهد و گزینه‌های زیادی را برای کار جدید ارائه می‌کند، همچنین نشان‌دهنده فقدان سازمان‌دهی سطح بالا است و ممکن است نشان دهد که اقتصاد ذخیره‌سازی هنوز در مرحله‌ای متمرکز بر توسعه روش‌شناختی است تا اصلاح روش‌شناختی. کاربران مدل‌های ذخیره‌سازی در حال حاضر در مضیقه هستند، زیرا مدل‌های ذخیره‌سازی «خارج از قفسه» (خارج از دنیای نرم‌افزار ارسال خریداری‌شده برای استقرار ذخیره‌سازی واقعی) کمی در دسترس هستند. دو استثنا مهم عبارت‌اند از ابزار تخمین ارزش ذخیره‌سازی موسسه تحقیقات نیروی برق، یک مدل اطلاعاتی کامل که می‌تواند عملکرد و اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس شبکه را تجزیه‌وتحلیل کند و هومر[1] که اکنون تجاری است و ابزار طراحی و بهینه‌سازی ریزشبکه که ابتدا در آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه یافت. اگرچه این ابزارها شروع خوبی هستند، اما انتخاب گسترده‌ای از ابزارهای نسبتاً ساده را که برای سیستم‌های مرتبط در دسترس هستند، مانند مدل‌های توزیع برق، ارائه نمی‌دهند. ازاین‌رو، مقایسه و توسعه روش‌های استانداردشده که می‌توانند به‌طور گسترده اعمال شوند، یک جهت ارزشمند برای کار جدید است.

اگرچه فضای تحلیلی برای توسعه مدل‌های اطلاعات کامل به‌خوبی تثبیت‌شده است، مدل‌سازی اطلاعات ناقص دارای انبوهی از ایده‌های خوب بدون پایه‌ای قوی در تئوری یا برتری نشان داده‌شده نسبت به روش‌های دیگر است. کار در این زمینه اغلب روش جدیدی را توسعه می‌دهد و نشان می‌دهد که برتر از روش‌های استاندارد برای یک مشکل خاص است؛ اما ما هیچ نوع نظریه جهانی برای توصیف اینکه کدام روش برای مشکلات خاص برتر است و چرا نداریم. ما پیشنهاد می‌کنیم که فرصتی برای مشارکت‌های مهم در این فضا، به‌طور بالقوه در ارتباط با پیشرفت‌های یادگیری ماشین مدرن وجود دارد.

حوزه سومی که تحقیقات جدید می‌تواند به سؤالات عملی کمک کند، در تجزیه‌وتحلیل تعامل بین طراحی بازار یا سیاست و ارزش‌گذاری و عملیات ذخیره‌سازی است. اگرچه روی این موضوع کلی کارشده است، اما سؤالات مهمی در سطوح خرده‌فروشی و عمده‌فروشی در مورد اینکه قوانین بازار چگونه بر اقتصاد ذخیره‌سازی و تصمیم‌گیری‌های عملیاتی تأثیر می‌گذارد و چگونه ذخیره‌سازی جدید بر بازارها در پاسخ به آن تأثیر می‌گذارد، وجود دارد. به‌عنوان‌مثال، چگونه شرکت‌های برق باید ساختارهای نرخ را به‌گونه‌ای طراحی کنند که صاحبان ذخیره‌سازی را تشویق کند تا مزایای سیستمی را تولید کنند بدون اینکه به مشتریان اجازه استفاده ناعادلانه را بدهند؟ در سطح عمده‌فروشی، طراحی‌های مختلف بازار، مانند بازارهای صرفاً انرژی در مقابل ظرفیت، تخصیص مسئولیت برای خدمات جانبی و طراحی آن خدمات چگونه بر مقدار ذخیره‌سازی مورد انتظار و نحوه ذخیره‌سازی تأثیر می‌گذارند. عمل کرد؟ در پاسخ، ذخیره‌سازی جدید چگونه بر قیمت‌ها در خدمات مختلف

[1] HOMER

انرژی و افزودن یا بازنشستگی سایر ژنراتورها تأثیر می‌گذارد؟ تحلیل‌هایی که به این سؤالات پاسخ می‌دهند معمولاً بین مجموعه‌ای از کارهایی قرار می‌گیرند که به بررسی اقتصادی کاربردهای ذخیره‌سازی خاص می‌پردازند و آن‌هایی که ارزش ذخیره‌سازی را در مدل‌سازی افزایش ظرفیت بررسی می‌کنند[۱ و ۲۸-۳۰].

۲-۶- نتیجه‌گیری

همانگونه که پیشتر اشاره شد سیستم‌های ذخیره‌سازی مبتنی بر باتری، فلایویل، و ابرخازن فناوری‌های با قابلیت تجاری‌سازی با پتانسیل برای کاربردهای سریع هستند. با توجه به بلوغ فناوری باتری و امکان استفاده از باتری‌ها به صورت پرتابل، این سیستم‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. بدین ترتیب که بیشترین پروژه‌های اجرایی در سال‌های اخیر مربوط به باتری‌های لیتیومی است که با توجه به کاربرد در صنعت حمل و نقل، پتانسیل بسیار بالایی دارند. بعلاوه باتری‌های جریانی یکی از انواع باتری‌های قابل شارژ با پتانسیل بالا جهت کاربرد در ذخیره‌سازی هستند. معرفی باتری‌های جریانی مبتنی بر آهن دارای پتانسیل بالایی برای استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی ایجاد کرده است. در سال‌های اخیر پروژه‌هایی که از این فناوری به عنوان سیستم ذخیره‌ساز استفاده کرده‌اند فزاینده بوده است. همچنین باتری‌های سرب-اسید از دیرباز برای بحث ذخیره‌سازی مطرح بوده‌اند. البته با توجه به کاهش هزینه تولید باتری‌های لیتیومی در دنیا، استفاده از باتری‌های سرب-اسید کمتر مورد توجه است. اما در کشور عزیزمان، با توجه به پتانسیل موجود جهت تولید باتری‌های سرب-اسید این فناوری نیز به عنوان یکی از فناوری‌های مرجح در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۷- مراجع:

[1] Baky MAH, Rahman MM, Islam AS. Development of renewable energy sector in Bangladesh current status and future potentials. Renewable Sustainable Energy Rev 2017;73:1184–97.

[2] Perera F. Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: solutions exist. Int J Environ Res Public Health 2017;15:16.

[3] Patel M, Zhang X, Kumar A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: a review. Renewable Sustainable Energy Rev 2016;53:1486–99.

[4] Patel M, Kumar A. Production of renewable diesel through the hydroprocessing of lignocellulosic biomass-derived bio-oil: a review. Renewable Sustainable Energy Rev 2016;58:1293–307.

[5] Rahman MM, Canter C, Kumar A. Well-to-wheel life cycle assessment of transportation fuels derived from different North American conventional crudes. Appl Energy 2015;156:159–73.

[6] Rahman MM, Canter C, Kumar A. Greenhouse gas emissions from recovery of various North American conventional crudes. Energy 2014;74:607–17.

[7] Rogelj J, Den Elzen M, H¨ohne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. Nature 2016;534:631.

[8] Rahman MM, Khan M-M-U-H, Ullah MA, Zhang X, Kumar A. A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community. Energy 2016;97: 151–60.

[9] Aneke M, Wang M. Energy storage technologies and real life applications–a state of the art review. Appl Energy 2016;179:350–77.

[10] Serra R, Niknia I, Par´e D, Titus B, Gagnon B, Lagani`ere J. From conventional to renewable natural gas: can we expect GHG savings in the near term? Biomass Bioenergy 2019;131:105396.

[11] Gulagi A, Ram M, Solomon AA, Khan M, Breyer C. Current energy policies and possible transition scenarios adopting renewable energy: a case study for Bangladesh. Renewable Energy 2020;155:899–920.

[12] Renewables. Global status report. REN21 Renewable Energy Policy Network/ Worldwatch Institute. Available: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/ 2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf>; 2016

[13] Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Appl Energy 2015;137:511–36.

[14] Ourahou M, Ayrir W, El Hassouni B, Haddi A. Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: challenges and prospects. Math Comput Simul 2020;167:19–31.

[15] Bajaj M, Singh AK. Grid integrated renewable DG systems: a review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques. Int J Energy Res 2020;44:26–69.

[16] Sinsel SR, Riemke RL, Hoffmann VH. Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources—a review. Renewable Energy 2020;145:2271–85.

[17] Basit MA, Dilshad S, Badar R, Sami ur Rehman SM. Limitations, challenges, and solution approaches in grid-connected renewable energy systems. Int J Energy Res 2020;44:4132–62.

[18] Colmenar-Santos A, Linares-Mena A-R, Molina-Ib´a˜nez E-L, Rosales-Asensio E, Borge-Diez D. Technical challenges for the optimum penetration of grid-connected photovoltaic systems: Spain as a case study. Renewable Energy 2020; 145:2296–305.

[19] Abbey C, Joos G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications. IEEE Trans Ind Appl 2007;43:769–76.

[20] Lu M-S, Chang C-L, Lee W-J, Wang L. Combining the wind power generation system with energy storage equipment. IEEE Trans Ind Appl 2009;45:2109–15.

[21] Barton JP, Infield DG. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. IEEE Trans Energy Convers 2004;19:441–8.

[22] Yekini Suberu M, Wazir Mustafa M, Bashir N. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. Renewable Sustainable Energy Rev 2014;35:499–514.

[23] Headley AJ, Copp DA. Energy storage sizing for grid compatibility of intermittent renewable resources: a California case study. Energy 2020;198:117310.

[24] Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review. Prog Nat Sci 2009;19:291–312.

[25] Guney MS, Tepe Y. Classification and assessment of energy storage systems. Renewable Sustainable Energy Rev 2017;75:1187–97.

[26] Baker J, Collinson A. Electrical energy storage at the turn of the millennium. Power Eng J 1999;13:107–12.

[27] Walawalkar R, Apt J, Mancini R. Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York. Energy Policy 2007;35:2558–68.

[28] Braeuer F, Rominger J, McKenna R, Fichtner W. Battery storage systems: an economic model-based analysis of parallel revenue streams and general implications for industry. Appl Energy 2019;239:1424–40.

[29] Killer M, Farrokhseresht M, Paterakis NG. Implementation of large-scale Li-ion battery energy storage systems within the EMEA region. Appl Energy 2020;260: 114166.

[30] Weinstock IB. Recent advances in the US Department of Energy's energy storage technology research and development programs for hybrid electric and electric vehicles. J Power Sources 2002;110:471–4.

[31] Koot M, Kessels JT, De Jager B, Heemels W, Van den Bosch P, Steinbuch M. Energy management strategies for vehicular electric power systems. IEEE Trans Veh Technol 2005;54:771–82.

[32] Hadjipaschalis I, Poullikkas A, Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. Renewable Sustainable Energy Rev 2009;13:1513–22.

[33] Poullikkas A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. Renewable Sustainable Energy Rev 2013;27:778–88.

[34] Díaz-Gonz´alez F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, Villaf´afila-Robles R. A review of energy storage technologies for wind power applications. Renewable Sustainable Energy Rev 2012;16:2154–71.

[35] Wikipedia, 2021, List of energy storage power plants, Wikimedia Foundation, edited 2022

[36] May GJ, Davidson A, Monahov B. Lead batteries for utility energy storage: a review. J Storage Mater 2018;15:145–57.

[37] Amirante R, Cassone E, Distaso E, Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. Energy Convers Manage 2017;132:372–87.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فصل ۳: هزینه تراز شده ذخیره‌سازی انرژی فعلی و افق ۲۰۳۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

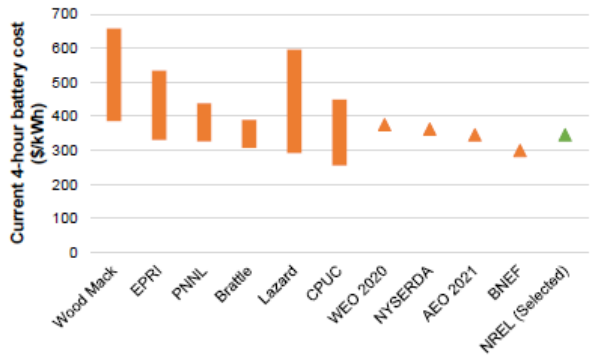
۳-۱- مقدمه

با رشد و تحول در صنعت ذخیره‌سازی شبکه، بررسی انواع فناوری‌ها و هزینه عملکرد آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. هدف این فصل عبارت است از بروزسانی محدوده هزینه فناوری‌ها با توجه به عملکرد و تعیین تراز ذخیره‌سازی انرژی.

هزینه‌های ذخیره‌سازی باتری در دهه گذشته به سرعت تغییر کرده است. در سال ۲۰۱۶، آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر (NREL) مجموعه‌ای از پیش‌بینی هزینه را برای باتری‌های لیتیوم یون در مقیاس کاربردی منتشر کرد(کول و همکاران ۲۰۱۶). تخمین‌های سال ۲۰۱۶ به دنبال برآوردهای مربوط به باتری خودروهای الکتریکی انجام گرفت زیرا؛ برآوردی از باتری‌های مقیاس کاربردی برای زمان بیشتر از ۳۰ دقیقه در دسترس نبود. در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰، پیش‌بینی هزینه باتری بر اساس مقالات مرتبط (کول و فریزر ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰)، به روز شد. این گزارش نیز تخمین هزینه را بر اساس داده‌های منتشر شده در سال ۲۰۲۰ و اوایل سال ۲۰۲۱ تکمیل می‌کند.

برآوردها در این گزارش بر روی سیستم‌های باتری لیتیوم یونی در مقیاس کاربردی برای استفاده در مدل‌های افزایش ظرفیت تمرکز دارند. NREL از سیستم استقرار انرژی منطقه‌ای (ReEDS) (براون و همکاران ۲۰۲۰) و مدل برنامه ریزی منابع (مای و همکاران ۲۰۱۳) (RPM) برای مدل سازی افزایش ظرفیت استفاده می کند، و پیش بینی هزینه باتری به دست آمده در اینجا برای استفاده در آن مدل ها طراحی شده است. علاوه بر این، پیش‌بینی‌ها قرار است پیش‌بینی هزینه منتشر شده در خط پایه فناوری سالانه (Annual Technology Baseline) را به اطلاع برساند[۱].

برای ارزیابی بهتر، مقدار گزارش‌شده توسط فلدمن و همکاران (۲۰۲۱) با سایر مقادیر منتشر شده مقایسه شده است (شکل ۳-۱) [۱-۳]. به دلیل تغییرات سریع در هزینه باتری، مقادیر گزارش شده قدیمی در نظر گرفته نشده است. این مقایسه اطمینان ما را نسبت به منطقی بودن مقدار شروعی که انتخاب کرده‌ایم افزایش می‌دهد، اگرچه نشان می‌دهد که عدم قطعیت قابل توجهی در قیمت فعلی سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری وجود دارد.



شکل ۳-۱- هزینه‌های کنونی باتری بر اساس مطالعات ۲۰۱۹ و بعد [۱-۳]

 DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۳-۲- رویکردهای مدل‌سازی برای اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی

سؤالات مربوط به اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی اغلب به تعیین نحوه عملکرد یا عملکرد آن ذخیره‌سازی متکی است. اگرچه برای سایر فناوری‌ها صادق است، تحلیل عملیات ذخیره‌سازی بهینه اغلب به سطوح پیچیدگی فراتر از پیچیدگی موردنیاز برای توربین‌های بادی یا نیروگاه‌های گاز طبیعی می‌رسد. بیشتر تحقیقات پیشرفته در زمینه اقتصاد ذخیره‌سازی انرژی بر تعیین عملکرد ذخیره‌سازی متمرکز است: چگونه ذخیره‌سازی باید در شرایط عدم قطعیت تصمیم‌گیری کند، چگونه ذخیره‌سازی باید تلاش‌ها را بین خدمات مختلف تقسیم کند، یا اینکه چگونه ذخیره‌سازی باید به‌طور استراتژیک در بازارها در مکان‌هایی که به اندازه کافی وجود دارد پیشنهاد دهد. مقیاس برای تأثیرگذاری بر قیمت‌ها اهمیت عملیات ذخیره‌سازی نیز در تعداد فزاینده شرکت‌های خصوصی ایجادشده برای فروش نرم‌افزار توزیع ذخیره‌سازی اختصاصی به صاحبان ذخیره‌سازی مشهود است. خواننده باید بداند که به‌موازات تحقیقات در دسترس عموم توضیح داده‌شده در این بررسی، نهادهای خصوصی درحال‌توسعه مالکیت معنوی خود در قالب الگوریتم‌هایی هستند که قصد دارند ارزش ذخیره‌سازی را برای مشتریان خود به حداکثر برسانند. برای هر دو حوزه عمومی و خصوصی، مرز تحقیقات اقتصاد ذخیره‌سازی به‌طورجدی بر درک عملیات ذخیره‌سازی بهینه تحت سناریوها و شرایط مختلف متمرکز است. به همین دلیل، ما یک بخش کامل را به روش‌های مدل‌سازی عملیات ذخیره‌سازی اختصاص می‌دهیم.

عملکرد ذخیره‌سازی انرژی تفاوتی اساسی با سایر فناوری‌های برق دارد که مدل‌سازی ذخیره‌سازی را هم چالش‌برانگیزتر و هم جالب‌تر می‌کند. این تفاوت در این است که ذخیره‌سازی انرژی یک فناوری با انرژی محدود است، به این معنی که نمی‌تواند به‌طور مداوم در هیچ حالت یا سرویسی کار کند، مگر اینکه آن حالت یا سرویس ازنظر انرژی خنثی باشد. اگرچه این تمایز ممکن است جزئی به نظر برسد، اما به این معنی است که تصمیم‌گیری در مورد اینکه در حال حاضر با یک دستگاه ذخیره‌سازی چه کاری انجام دهید بستگی به کاری دارد که درگذشته انجام داده است و قصد دارید در آینده با آن چه کاری انجام دهید. تجزیه‌وتحلیل پیچیده ذخیره‌سازی این مفهوم برای مدل‌سازی برق کاملاً جدید نیست – پیامدهای عملیاتی و اقتصادی محدودیت‌های افزایشی و محدودیت‌های راه‌اندازی نیروگاه‌ها موضوعی است که در حال حاضر در مدل‌سازی توزیع سیستم برق موردبررسی قرار می‌گیرد. بااین‌حال، وابستگی بین زمانی که برای مدل‌های ذخیره‌سازی انرژی خوب است، اغلب نادیده گرفته می‌شود یا به روش‌های ساده‌سازی شده برای اکثر مدل‌سازی‌های سیستم برق موردبررسی قرار می‌گیرد، زیرا این پویایی‌ها برای فناوری‌های تولید سنتی اهمیت کمتری دارند، درحالی‌که برای عملیات ذخیره‌سازی مرکزی هستند.

به‌طور فرضی، مسئله اتکای بین زمانی را می‌توان با ذخیره‌سازی به‌اندازه کافی بزرگ غلبه کرد، به‌طوری‌که محدودیت‌های انرژی مهم نبود؛ اما این استراتژی برخلاف مفاهیم اقتصاد ذخیره‌سازی است: معمولاً سؤالات اقتصادی که ما از ذخیره‌سازی می‌پرسیم این است: «حداقل مقدار ذخیره‌سازی که برای برخی اهداف نیاز دارم چقدر است؟» یا «حداکثر مقدار ارزش یا خدماتی که می‌توانم از یک دستگاه ذخیره‌سازی معین استخراج کنم، چقدر است؟» و سؤال محدودیت‌ها در هر دو مورد قابل‌اجتناب نیست. علاوه بر این، با وجود پیچیدگی تعامل زمانی،

مدل‌سازی ذخیره‌سازی از مزایای عملیات ساده به روش‌های دیگر برخوردار است. بیشتر فناوری‌های ذخیره‌سازی، به‌طور مؤثر، کاملاً پاسخ‌گو هستند – قادر به پاسخگویی سریع سیگنال‌های کنترلی در حال تغییر برای شارژ و دشارژ هستند. فن‌آوری‌های الکتروشیمیایی و چرخ طیارها ساده‌ترین هستند و محدودیت‌های شارژ و دشارژ به‌عنوان محدودیت اصلی وجود دارد. نیروگاه آبی پمپ شده مشابه است، اگرچه محدودیت‌های هیدرولوژیکی ممکن است بسته به محل سد، زمان و نحوه عملکرد ذخیره‌سازی را تعیین کند. طرح‌های استاندارد CAES از احتراق گاز طبیعی به‌عنوان منبع گرمایی برای گرم کردن هوای در حال انبساط استفاده می‌کنند و بنابراین تا حدی وابستگی اقتصادی و عملیاتی به در دسترس بودن گاز طبیعی دارند.

علاوه بر محدودیت‌هایی که در بالا توضیح داده شد، تمام فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی دارای تلفاتی هستند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته اصلی تقسیم کرد: تلفات سیکل[1] و تخلیه خود. تلفات سیکل نتیجه اجتناب‌ناپذیر قانون دوم ترمودینامیک است، وقتی با طرح‌های ذخیره‌سازی عملی ترکیب شود. به‌طور خلاصه، ذخیره‌سازی هرگز نمی‌تواند همان مقدار انرژی را که برای شارژ آن استفاده‌شده است، ارائه دهد. این تلفات معمولاً با استفاده از یک رقم بازده رفت‌وبرگشت برای فناوری توصیف می‌شوند که ممکن است به‌عنوان یک ثابت برای اهداف مدل‌سازی تنظیم شود یا به‌عنوان تابعی از پارامترهای دیگر در تحلیل‌های پیچیده‌تر تغییر کند. به همین ترتیب، نسبت دادن تلفات به شارژ یا تخلیه (هر دو) می‌تواند اثرات جزئی بر مدل‌سازی ذخیره‌سازی داشته باشد. خود تخلیه رخ می‌دهد چه ذخیره‌سازی در حال چرخش باشد یا نه. اگرچه همه اشکال ذخیره‌سازی مقداری تخلیه خود را تجربه می‌کنند، اما اغلب به‌اندازه‌ای کوچک است که برای اهداف مدل‌سازی بی‌اهمیت باشد. بااین‌حال، در برخی فناوری‌ها، مانند تلفات اصطکاک در چرخ طیارها یا اتلاف گرما در ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، خود تخلیه می‌تواند در مقیاس مشابه یا بزرگ‌تر از تلفات سیکل باشد.

مدل‌های عملیات ذخیره‌سازی انرژی برای تعیین یا تقریب عملیات ذخیره‌سازی بهینه تحت یک سناریوی معین طراحی‌شده‌اند. اگرچه تحلیل‌هایی از عملیات ذخیره‌سازی وجود دارد که به‌صراحت این هدف را بیان نمی‌کند، پیشرفت یک الگوریتم خاص به‌طور ضمنی نشان می‌دهد که خروجی آن الگوریتم تحت سناریو یا مجموعه‌ای از محدودیت‌ها بهینه (حداقل خوب) است. معیار تصمیم‌گیری برای ذخیره انرژی نیز نسبتاً ساده است: در هر نقطه از زمان، چه مقدار انرژی باید به دستگاه ذخیره یا خارج شود؟ بااین‌حال، پاسخ به این سؤال می‌تواند به مدل‌های پیچیده‌ای نیاز داشته باشد که ماهیت بین زمانی عملیات ذخیره‌سازی، عدم قطعیت در مورد آینده و حتی اقدام استراتژیک در مفهوم نظری بازی را توضیح دهد. در این کار، مدل‌های عملیات ذخیره‌سازی را به چهار دسته تقریبی افزایش پیچیدگی تقسیم می‌کنیم: مدل‌های زمانی، مدل‌های اطلاعات کامل، مدل‌های اطلاعات ناقص و مدل‌های عملیات استراتژیک[۴].

[1] Cycling

۳-۲-۱- مدل‌های زمانی

ساده‌ترین شکل مدل ذخیره‌سازی، مدلی است که جنبه زمانی ذخیره‌سازی انرژی را نادیده می‌گیرد که در مواردی که عملیات ذخیره‌سازی به اندازه کافی قابل پیش‌بینی است که نیازی به محاسبه ندارد، توجیه می‌شود. در این موارد، برخی از الگوهای عملیاتی معمولی در نظر گرفته می‌شود و اثرات سیستم یا اقتصاد به‌طور مستقیم محاسبه می‌شود. به‌عنوان‌مثال، پولیکاس[۱] به بررسی اقتصاد سیستم‌های حرارتی خورشیدی مختلف در قبرس، ازجمله مقادیر متفاوت ذخیره حرارتی می‌پردازد. در این حالت، ذخیره حرارتی به‌صورت عملیاتی به‌عنوان ساعات متغیر خروجی از نیروگاه خورشیدی، از ۵ ساعت (بدون ذخیره) تا ۲۴ ساعت مدل‌سازی می‌شود. مثال دیگری نیز تأثیری را که افزودن ذخیره انرژی چرخ طیار برای تنظیم فرکانس می‌تواند بر انتشارات شبکه داشته باشد، بررسی می‌کند. اگرچه تلاش مدل‌سازی برای ناوگان تولید پیچیده بود، افزودن ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار به‌عنوان کاهش نیاز تنظیم فرکانس برای سیستم مدل‌سازی شد. این یک فرض منصفانه با توجه به ویژگی‌های عملکرد فناوری داشت که چرخ طیارها به طور مداوم برای ارائه این خدمات کار می‌کنند. در هر دو مثال، انرژی داخل و خارج از دستگاه ذخیره‌سازی به‌طور صریح ردیابی نمی‌شود و هیچ الگوریتمی برای تصمیم‌گیری در مورد زمان کارکرد ذخیره‌سازی وجود ندارد[۳].

۳-۲-۲- مدل‌های اطلاعات کامل[۲]

بیشتر مدل‌های ذخیره‌سازی داده‌های سری زمانی را در مورد پارامترهای عملیاتی مهم ذخیره‌سازی، مانند شارژ یا تخلیه ذخیره‌سازی و وضعیت شارژ، دنبال می‌کنند و از نوعی الگوریتم برای تصمیم‌گیری درباره زمان شارژ و تخلیه استفاده می‌کنند. مشکل زمانی آسان‌تر می‌شود که دانش در مورد شرایط آینده به الگوریتم با قطعیت شناخته شود و این مدل‌ها اغلب به‌عنوان مدل‌های اطلاعات کامل شناخته می‌شوند. وجود اطلاعات کامل از نظر مدل‌سازی بی‌اهمیت نیست زیرا امکان الگوریتم‌هایی را فراهم می‌کند که می‌توانند استراتژی بی‌چون‌وچرای بهینه را پیدا کنند. مسئله واضح با مفروضات اطلاعات کامل این است که واقعیت به‌ندرت اطلاعات کاملی را در مورد رویدادهای آینده ارائه می‌دهد و در عوض شرکت‌کنندگان سیستم برق را مجبور می‌کند در شرایط عدم قطعیت استراتژی انجام دهند. بااین‌حال، نتایج حاصل از مدل‌های اطلاعاتی کامل می‌تواند مفید باشد، زیرا آن‌ها یک حد بالایی برای قابلیت‌های عملیاتی و اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی ارائه می‌کنند

---

[۱] Poullikkas

[۲] مدل اطلاعات کامل: مدل ذخیره‌سازی که از اطلاعات کامل در مورد شرایط آینده استفاده می‌کند یا فرض می‌کند که به یک مدل به‌اندازه کافی پیچیده اجازه می‌دهد تا الگوی عملیاتی بهینه را شناسایی کند.

و در برخی سناریوها، نتایجی را ایجاد می‌کنند که از سناریوی اطلاعات ناقص دور نیستند و در آن درآمد واقعی ممکن است به ۸۵٪ یا بیشتر از حداکثر درآمد نظری برسد.

یک راه متداول برای حل عملیات ذخیره‌سازی بهینه تحت اطلاعات کامل، از طریق برنامه‌ریزی خطی[۱] است که در آن طیف وسیعی از رویکردها با مبنای منطقی یکسان اعمال‌شده است؛ مانند سایر زمینه‌ها، چالش رویکردهای LP معمولاً در فرمول‌بندی مسئله به‌گونه‌ای است که محدودیت‌های روش را برآورده کند. مدل‌های ذخیره‌سازی انرژی LP با پیشرفت میدان به پیچیدگی فزاینده‌ای دست‌یافته‌اند و تعداد بیشتری از خدمات، پارامترهای ذخیره‌سازی یا محدودیت‌های عملیاتی را ادغام می‌کنند. در تحقیقی با ایجاد و به‌کارگیری مدلی از ذخیره‌سازی CAES، بهینه‌سازی عملیات آن بین خدمات انرژی و ذخیره با استفاده از رویکرد LP، یک برنامه کاربردی ساده ارائه می‌دهد. در مقاله‌ای دیگر یکی از پیچیده‌ترین مدل‌های اطلاعات کامل را ارائه می‌کند که عملکرد بهینه منابع ذخیره‌سازی توزیع‌شده را تعیین می‌کند که خدمات متعددی را ارائه می‌کند (آربیتراژ[۲]، تنظیم فرکانس، ذخیره چرخش و کاهش تراکم شبکه) و درعین‌حال جبران مناسب را ارائه می‌کند. رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط[۳] که آن‌ها توسعه می‌دهند، حتی شامل نیازهای توان و تحویل فعال و غیرفعال نیز می‌شود.

مقاله‌ای دیگر یک الگوریتم جایگزین را توصیف می‌کند که از اطلاعات کامل برای به حداکثر رساندن درآمد آربیتراژ استفاده می‌کند که در آن یک فرآیند تکراری جفت‌های زمانی قیمت بالا یا قیمت پایین را پیدا می‌کند، بررسی می‌کند که آیا انرژی می‌تواند از یکی به دیگری منتقل شود، سپس به انتقال متعهد می‌شود و به آن توسط شروع چرخه با جستجوی یک جفت دیگر بازمی‌گردد. الگوریتم زمانی متوقف می‌شود که دیگر نتواند انتقال انرژی را که هم سودآور باشد و هم با محدودیت‌های ذخیره‌سازی مجاز باشد، پیدا کند. هنگامی‌که این روش به‌درستی اجرا شود، نتیجه مشابه روش LP استانداردتر را به دست می‌دهد، اما ممکن است مبنای ساده‌تری برای گسترش تحلیل به سایر خدمات یا عدم قطعیت‌ها باشد. به‌عنوان‌مثال، می‌توان با مسدود کردن دوره‌هایی که ذخیره‌سازی خدمات ذخیره‌ای را از جستجوی آربیتراژ انرژی ارائه می‌کند، روش را گسترش داد تا خدمات ذخیره را شامل شود. همچنین شامل عدم اطمینان در مورد قیمت‌های آتی با جایگزینی تمام قیمت‌های انرژی آتی با قیمت‌های میانگین فصلی سال قبل می‌شوند. این به‌طور مؤثر به این معنی است که الگوریتم کاملاً مشکل عملیات ذخیره‌سازی را حل می‌کند، اما با ورودی‌های قیمتی که به‌طورکلی (اما نه دقیقاً) صحیح هستند. الگوریتم دیگری که از سادگی مفهومی و الگوریتمی بهره می‌برد، «القای معکوس» برای تعیین عملکرد ذخیره‌سازی انرژی است که می‌تواند هم خدمات ذخیره انرژی و هم در چرخش را ارائه دهد، اعمال می‌شود. در این روش محاسبات به‌صورت معکوس در زمان انجام می‌شود و از پایان یک دوره زمانی (مثلاً

---

[۱] برنامه‌ریزی خطی (LP): دسته وسیعی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که اغلب در تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های انرژی استفاده می‌شود. مدل‌های LP زمانی که به‌درستی در محدودیت‌های روش‌شناختی فرموله شوند، می‌توانند به‌طور مؤثر راه‌حل بهینه جهانی برای مشکلات را شناسایی کنند.

[۲] arbitrage

[۳] MILP

یک روز) شروع می‌شود و مقدار انرژی در انبار در یک ساعت به‌عنوان مقدار نگهداری آن در ساعت قبل در نظر گرفته می‌شود. با کار از پایان به آغاز، ارزش استفاده از انرژی در هر مرحله زمانی با ارزش نگه‌داشتن آن برای یک مرحله زمانی بعدی مقایسه می‌شود[۴].

۳-۲-۳- مدل‌های اطلاعات ناقص

درواقع، بیشتر فرصت‌های اقتصادی برای ذخیره‌سازی انرژی شامل آگاهی نامشخص از شرایط آینده، به علت قیمت برق، تولید انرژی تجدیدپذیر، تقاضای برق یا عوامل دیگر است. پس منطقی است که ما باید الگوریتم‌هایی را برای عملیات ذخیره‌سازی توسعه دهیم که به این عدم اطمینان در مورد آینده توجه کنند، هم به این دلیل که نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهند و هم به این دلیل که هر الگوریتمی که برای کنترل دستگاه‌های ذخیره‌سازی واقعی استفاده می‌شود به اطلاعات آینده به‌جز پروکسی (به‌عنوان‌مثال، قیمت‌های روز آینده یا پیش‌بینی) دسترسی ندارد. روش‌های مورداستفاده برای کارکرد ذخیره‌سازی در آینده نامشخص متفاوت است، اما به‌طورکلی الگوریتم‌هایی با پیچیدگی‌های متفاوت برای تعیین عملیات ذخیره‌سازی بهینه در حال حاضر، با توجه به برخی انتظارات ثابت در مورد وضعیت‌های آینده، با تکرار محاسبات در یک فرکانس از پیش تعریف‌شده، اعمال می‌شود. توصیف وضعیت‌های آینده بسته به مشکل موردبررسی می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد و عموماً کمتر از رویکردهای اطلاعاتی کامل استانداردشده است، اما اغلب به شکل پیش‌بینی الگوهای تقاضا، الگوهای قیمت یا تولید انرژی تجدیدپذیر بر اساس داده‌های قبلی و به‌کارگیری یک الگوریتم تصمیم‌گیری منطقی (اگرچه همیشه کاملاً بهینه نیست) هست.

یک الگوریتم اطلاعات ناقص ساده برای ذخیره‌سازی که در بازار انرژی کار می‌کند، تعیین قیمت خرید است که زیر آن ذخیره‌سازی تا حد امکان شارژ می‌شود و قیمت فروش که بالاتر از آن ذخیره‌سازی تا حد امکان به فروش می‌رسد. قیمت خریدوفروش بر اساس مقادیر بهینه از داده‌های قیمت تاریخی تعیین می‌شود. اگرچه نقاط قیمت خریدوفروش ممکن است در طول سال ثابت باشد، یک رویکرد پیچیده‌تر می‌تواند آن‌ها را بر اساس چرخه‌های فصلی، هفتگی، روزانه و یا وضعیت فعلی شارژ انبار تغییر دهد. در یک تحقیق چندین الگوریتم ذخیره‌سازی مختلف برای آربیتراژ انرژی در بازارهای مختلف برق اروپا نشان می‌دهد. یک روش میانگین متحرک را از امور مالی قرض می‌گیرند و همچنین از چندین روش مختلف برای ایجاد پیش‌بینی قیمت استفاده می‌کنند که در مقابل آن‌ها عملیات ذخیره‌سازی را بهینه می‌کنند، ازجمله:

(الف) استفاده از داده‌های تاریخی برای یافتن الگوهای قیمت بلندمدت روزانه و هفتگی.

(ب) پیش‌بینی اینکه موارد زیر روز یا هفته با همان روز یا هفته سال قبل مطابقت دارد.

(ج) پیش‌بینی اینکه روز یا هفته بعد با روز یا هفته قبل مطابقت دارد.

 DOI: 10.30503/nripress.2020.167

یک استراتژی جایگزین برای پیش‌بینی قیمت‌های برق آتی به‌صورت متوالی، استفاده از قیمت‌های روز یا ساعت آینده به‌عنوان پیش‌بینی‌های معقول برای تعیین عملیات ذخیره‌سازی در بازارهایی است که این قیمت‌ها در دسترس هستند.

۳-۲-۴- مدل‌های عملیات استراتژیک

پیچیده‌ترین مدل‌های ذخیره‌سازی آن‌هایی هستند که تأثیر عملیات ذخیره‌سازی بر خود بازار را در نظر می‌گیرند و تلاش می‌کنند تا پس از در نظر گرفتن اثرات بازار و یا اقدامات استراتژیک سایرین، به یک استراتژی عملیاتی دست یابند که سود شرکت‌کنندگان یا هدف دیگری را به حداکثر برساند. این نوع مدل قیمت ساز ممکن است زمانی موردنیاز باشد که مقیاس ذخیره‌سازی در نظر گرفته‌شده نسبت به سیستم برق بزرگ باشد یا در مواردی که فعالان بازار انگیزه اقتصادی مستقیمی برای انجام اقدامات استراتژیک دارند. ما این نوع مدل را به دو دسته تقسیم می‌کنیم: الگوریتم‌هایی که یک تصمیم‌گیرنده را در نظر می‌گیرند که عملیات ذخیره‌سازی را با منابع دیگر بهینه می‌کند و آن‌هایی که اقدام استراتژیک را از تصمیم‌گیرندگان رقیب در بازار در نظر می‌گیرند.

تحقیقی نمونه‌ای از دسته اول را با افزودن مقادیر غیر حاشیه‌ای ذخیره انرژی به یک شبکه برق مدل‌سازی شده با مدل توزیع سنتی ارائه می‌دهد. به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر ذخیره‌سازی بر ارسال منابع دیگر، از روش تکراری استفاده می‌کنند: قیمت‌های ساعتی را بدون ذخیره‌سازی محاسبه می‌کنند، سپس عملیات ذخیره‌سازی بهینه را تحت آن قیمت‌ها تعیین می‌کنند و عملیات ذخیره‌سازی را به مدل اعزام اضافه می‌کنند. سپس دوباره اجرا می‌شود و قیمت‌های جدید با زمان متفاوت را تولید می‌کنند. یک ارسال جدید برای ذخیره‌سازی بر اساس این قیمت‌های جدید محاسبه می‌شود و به‌طور میانگین در عملیات ذخیره‌سازی از تکرارهای قبلی محاسبه می‌شود و درنهایت به یک راه‌حل همگرا می‌شود. در تحقیق دیگری مدل دقیق‌تری ازجمله تجزیه‌وتحلیل مکان (با استفاده از سیستم گذرگاه ۲۴ IEEE) برای تعیین بهینه استقرار ذخیره انرژی و عملکرد آن ارائه می‌دهند. استراتژی در این تحلیل با یک مدل تعهد یا ارسال نسبتاً سنتی شروع می‌شود که شامل ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان یک شرکت‌کننده است و سپس از یک الگوریتم جستجوی سطح بالاتر برای آزمایش ارزش مقادیر بسیار زیاد ذخیره انرژی در هر گره استفاده می‌کند. این به الگوریتم اجازه می‌دهد مکان‌های با بالاترین ارزش را شناسایی کند و مقیاس ذخیره‌سازی با بررسی میزان استفاده از دستگاه ذخیره‌سازی تعیین می‌شود. روش دیگری هدف مشابهی با این روش دارد، اما از فرمول MILP برای تعیین مکان، اندازه و سودآوری ذخیره انرژی استفاده می‌کنند.

مدل‌سازی تعامل استراتژیک بین رقبا با استفاده از یک مدل نظری بازی که شامل عملیات (و تصمیمات بالقوه سرمایه‌گذاری) نیز می‌شود، چالش‌برانگیز است و معمولاً منجر به مدل‌هایی می‌شود که از نظر محاسباتی بسیار فشرده هستند. در روشی از روش تجزیه Benders در چارچوب LP برای بررسی استراتژی بهینه صاحب ذخیره‌سازی برای سرمایه‌گذاری و عملیات ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از یک رویکرد ریاضی برای مطالعه رفتار اقتصادی ژنراتورها و صاحبان ذخیره‌سازی در یک بازار رقابتی با و بدون قدرت بازار استفاده کرد.

ذخیره‌سازی جدید رفاه کلی را در یک بازار رقابتی بهبود می‌بخشد، اما در برخی موارد که شرکت‌ها قدرت بازار کافی دارند، می‌تواند رفاه را کاهش دهد.

۳-۳- تحلیل‌های اقتصادی ذخیره انرژی

این بخش به بررسی سؤالاتی که در مورد اقتصاد ذخیره انرژی پرسیده شده است می‌پردازد. ما سعی می‌کنیم حسی از گستردگی تحقیقات موجود را ارائه دهیم، بخش را در موضوعات تحلیلی مختلف سازمان‌دهی کنیم و همچنین جزئیات مربوطه را در مورد رویکرد و نتیجه‌گیری از ادبیات ارائه دهیم.

رایج‌ترین و ساده‌ترین دسته تحلیل اقتصادی ذخیره‌سازی، کاری است که درآمد، مزایا، سود خالص یا مقرون‌به‌صرفه بودن ذخیره‌سازی را برای یک کاربرد خاص در نظر می‌گیرد. به‌عنوان‌مثال می‌توان به مقاله‌ای اشاره کرد که در آن اقتصاد باتری‌ها و چرخ طیارهای سدیم سولفور را در ایالت نیویورک بررسی کردند و دریافتند که قیمت برق در آن زمان آن‌ها را سودآور می‌کند. در تحقیقی دیگر اقتصاد CAES را با توربین‌های گازی برای مدیریت تغییرپذیری توان باد مقایسه کردند. مزایای یک کارخانه CAES را از منظر خصوصی و سیستمی بررسی کردند و شامل بهینه‌سازی مشترک بین انرژی و خدمات جانبی در یک سیستم IEEE 24-bus می‌شود. در مقاله‌ای دیگر افزودن ذخیره‌سازی به نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، مقایسه هزینه ذخیره‌سازی با منافع درآمد مستقیم برای مالک، شناسایی مقدار بهینه ذخیره‌سازی با تغییر هزینه ذخیره‌سازی را در نظر گرفته‌اند. کاربردهای مشابه (ارزش افزودن ذخیره به باد) با استفاده از رویکردهای مختلف موردمطالعه قرارگرفته است. از یک مدل مبتنی بر PLEXOS برای بررسی مزایایی که CAES برای کاهش و چرخه ژنراتور در ایرلند تحت گسترش مداوم تولید باد خواهد داشت، استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در سناریویی با گسترش قابل‌توجه باد، مزایای سیستم خالص وجود دارد.

یک حوزه تحقیقاتی فعال و رو به رشد برای ذخیره‌سازی انرژی، بررسی مزایای انباشته‌ای است که ذخیره‌سازی می‌تواند ارائه دهد و توسعه الگوریتم‌هایی است که به ذخیره‌سازی اجازه می‌دهد تا بین سرویس‌های مختلف بهینه شود. چالش کلی در این فضا این است که ارائه یک سرویس (مثلاً آربیتراژ انرژی) به دلیل محدودیت در ظرفیت انرژی، میزان سایر خدمات قابل‌ارائه را کاهش می‌دهد. این بدان معناست که کل درآمدی که ذخیره‌سازی می‌تواند از گروهی از خدمات به دست آورد، کمتر از کل است، اگر ذخیره‌سازی هر سرویس را به‌صورت جداگانه ارائه دهد. ازاین‌رو، توسعه الگوریتم باید از ترکیبی از روش‌های پیشرفته و مفروضات قابل دفاع و اکتشافی برای بهینه‌سازی مشترک در سرویس‌های مختلف استفاده کند. تحقیقی یک بررسی دقیق از تلاش‌های گذشته ارائه می‌کند و یک مدل اطلاعاتی کامل ایجاد می‌کند که پیشنهادهای ذخیره‌سازی را در بازارهای انرژی روز آینده، انرژی زمان واقعی و تنظیم فرکانس بهینه می‌کند. یک رویکرد جایگزین برای ذخیره‌سازی در محل مشتری ارائه می‌دهد که خدمات تنظیم و چرخش ذخیره را به بازار عمده‌فروشی ارائه می‌دهد و درعین‌حال مصرف خود

مصرف انرژی تجدیدپذیر محلی و قیمت‌های زمان استفاده را نیز مدیریت می‌کند. تجزیه‌وتحلیل Brattle از ذخیره‌سازی در کالیفرنیا به این نتیجه رسید که مزایای ذخیره‌سازی روی‌هم تقریباً سه برابر بزرگ‌تر از بزرگ‌ترین جریان ارزش (صرفه‌جویی در ظرفیت تولید) است.

تمرکز بر ذخیره‌سازی انرژی در مدل‌های افزایش ظرفیت می‌تواند بینشی در مورد اینکه چگونه فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی به تغییرات بلندمدت در طراحی، بهره‌برداری و اقتصادی شبکه الکتریکی کمک می‌کنند، ارائه دهد. در مقاله‌ای از یک مدل توسعه ظرفیت MILP برای استقرار تولید، انتقال و ذخیره‌سازی برای برآورده کردن یک محدودیت استاندارد پورتفولیوی[1] تجدیدپذیر استفاده می‌کند و دریافته است که بهینه‌سازی مشترک هر سه فناوری می‌تواند مزایای بیشتری نسبت به تمرکز بر تولید و انتقال ایجاد کند. مجموعه‌ای از کار را در موردبررسی ارزش ذخیره انرژی در کمک به دستیابی به طرح‌های کربن‌زدایی انگلستان خلاصه می‌کند و تحلیل مشابهی را برای ایالات‌متحده ارائه می‌دهد.

یک موضوع جداگانه از تحقیقات ذخیره‌سازی انرژی معمولاً با در نظر گرفتن ذخیره‌سازی در مکان‌های تجاری یا مسکونی شامل درک ارزش ذخیره‌سازی برای کاربردهای توزیع‌شده است. اقتصاد ذخیره‌سازی می‌تواند در این کاربرد کاملاً متفاوت باشد زیرا شکاف بین ساختارهای نرخ آب و برق و قیمت‌های عمده‌فروشی و مکمل‌های بالقوه با تولید محلی (مانند انرژی خورشیدی روی پشت‌بام) و تقاضا وجود دارد. تحلیل‌های مختلف دیدگاه‌های متفاوتی را در مورد سؤال اندازه ذخیره‌سازی بهینه و عملکرد برای مشتریان برق ارائه می‌کنند؛ ازجمله پاسخ به ساختارهای نرخ پاسخ تقاضا و همچنین فرمول‌بندی‌های کلی برای مشکل. در تحقیقی در نظر گرفته‌شده است که چگونه ذخیره‌سازی مسکونی می‌تواند مکمل خورشیدی مسکونی باشد، زمانی که هر دو منبع می‌توانند در میان مجموعه‌ای از خانه‌های همسایه به اشتراک گذاشته شوند. آن‌ها دریافتند که مصرف خود PV از خوشه زمانی که به‌صورت گروهی به‌جای منازل انفرادی اداره می‌شود ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و ذخیره‌سازی مشترک آن را ۵ درصد بیشتر از ذخیره‌سازی فردی افزایش می‌دهد. اقتصاد بارهای حرارتی مسکونی (تهویه مطبوع، آبگرمکن، یخچال) نیز در نظر گرفته‌شده است که می‌توانند به‌عنوان ذخیره انرژی عمل کنند و متوجه شوند که اقتصاد آن‌ها به‌خوبی با فناوری‌های ذخیره‌سازی توزیع‌شده موجود رقابت می‌کند. همچنین در تحقیقی دیگر ارزش ذخیره‌سازی را در بهبود ریزشبکه‌های بادی–دیزل در مناطق دورافتاده کانادا بررسی می‌کنند.

جریان دیگری از تحقیقات مربوطه شامل بررسی عمیق‌تر در مورد اثرات مدل‌سازی واقعی‌تر اما پیچیده‌تر ذخیره‌سازی یا اجزای دیگر است. یکی از آن‌ها دو مدل مختلف از تخریب باتری را برای باتری‌هایی که آربیتراژ انرژی انجام می‌دهند، اعمال می‌کنند. آن‌ها دریافتند که این مدل‌سازی واقعی‌تر تخریب، سود را بین ۱۲ تا ۴۶ درصد کاهش می‌دهد، اما این رقم را می‌توان با گنجاندن تابع هزینه چرخه در مدل عملیاتی ذخیره‌سازی بهبود بخشید. یک مدل باتری ریزشبکه دقیق‌تر را پیشنهاد می‌کند که شامل کارایی است که با دما و نرخ شارژ تغییر می‌کند و کاهش ظرفیت که در مدل عملیاتی ادغام می‌شود. در تحقیقی دیگر یک چارچوب MILP برای توزیع بهینه ذخیره‌سازی ایجاد می‌کند که

[1] portfolio

نرخ‌های شارژ متغیر، بازده متغیر و تخریب باتری را برای ارزیابی میزان تغییر این اثرات واقعی در عملیات ذخیره‌سازی بهینه در نظر می‌گیرد[۵-۷].

۳-۴- آنالیزهای زیست‌محیطی ذخیره انرژی

رابطه بین ذخیره انرژی و انتشارات سیستم برق پیچیده است و به ویژگی‌های سیستم برقی که ذخیره‌سازی در آن تعبیه‌شده است بستگی دارد. درنتیجه، حجم رو به رشدی از ادبیات بر روی استفاده از مدل‌های فنی-اقتصادی ذخیره‌سازی انرژی برای برآورد اثرات انتشار عملیات ذخیره‌سازی و درک چگونگی تأثیرگذاری آن توسط عوامل مختلف متمرکزشده است. تحقیقات اولیه مفاهیمی را معرفی کردند که بعداً گسترش خواهند یافت، مانند تجزیه‌وتحلیل Denholm & Holloway در سال ۲۰۰۵ که نشان می‌دهد ذخیره‌سازی شارژ شده با نیروی زغال‌سنگ نسبت به یک نیروگاه جدید که با قانون هوای پاک سازگار است، انتشار بیشتری از SO_2 و NO_x دارد. در تحقیقات دیگر مبنای مفهومی بیشتری از رابطه بین ذخیره‌سازی و انتشار را در «دوازده اصل برای ذخیره انرژی سبز در برنامه‌های شبکه» ارائه کردند که ملاحظات طراحی، بهره‌برداری و یکپارچه‌سازی سیستم را توصیف می‌کند.

تجزیه‌وتحلیل تخمین اثر ذخیره‌سازی بر انتشار از دیدگاه‌های مختلف، ازجمله کاربردهای ذخیره‌سازی مختلف (عمده‌فروشی در مقابل توزیع)، رویکردهای مدل‌سازی انتشار (بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در مقابل داده‌های مدل‌سازی شده) و چارچوب‌های زمانی (تأثیر امروزی در مقابل اثرات آتی) تکمیل‌شده است. نتیجه کلی این مجموعه کار این است که ذخیره‌سازی امروزی تمایل به افزایش اندکی در انتشار گازهای گلخانه‌ای از سیستم برق دارد، اما این اثر در آینده معکوس خواهد شد زیرا ذخیره‌سازی با افزایش مقادیر باد و خورشید تعامل مثبت دارد. دو روش اصلی برای تخمین اثرات انتشار عملیات ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. در اول، داده‌های انتشارات تاریخی برای تخمین نرخ انتشار نهایی با زمان متغیر یک شبکه برق استفاده می‌شود – این نرخ انتشار ژنراتور حاشیه‌ای است و تغییر مورد انتظار در انتشار ناشی از تغییرات جزئی در عرضه یا تقاضای برق را نشان می‌دهد. هنگامی‌که با یک مدل اقتصادی که عملیات ذخیره‌سازی را ارائه می‌دهد، ترکیب می‌شود، نرخ انتشار نهایی می‌تواند برای تخمین اثر انتشار آن عملیات استفاده شود. روش انتشار حاشیه‌ای می‌تواند تخمین‌های دقیق و بسیار دقیقی از اثرات انتشار ارائه دهد، اما ازآنجایی‌که ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ یا برای شبکه‌های آینده با ترکیب تولید متفاوت در نظر گرفته می‌شود، کمتر مناسب می‌شود. برای درک این سناریوها، مدل‌های توزیع سیستم برق از انواع مختلف با نرخ انتشار به ژنراتورهای مختلف اختصاص داده‌شده است. اگرچه سطح پیچیدگی متفاوت است – برخورد متفاوت با محدودیت‌های انتقال و سطح شیب‌دار، برخورد متفاوت با انتشارات تفکیک‌شده در سطح نیروگاه یا تغییر به‌عنوان تابعی از توان خروجی، رفتار متفاوت با خدمات جانبی یا حاشیه‌های ذخیره – مفهوم اصلی اجرای یکسان مدل سیستم برق با و بدون ذخیره انرژی و بررسی تفاوت‌ها ازنظر انتشار کل، ساخت یا عملیات ژنراتور و اقتصادی است.

در تحلیلی در سال ۲۰۱۳ از ذخیره‌سازی عمده‌فروشی در تگزاس، کارسون و نوان[۱] از یک مدل دو دوره‌ای ساده از عملیات ذخیره‌سازی و داده‌های انتشار تاریخی برای تخمین نرخ‌های انتشار حاشیه‌ای استفاده کردند و دریافتند که انتظار می‌رود ذخیره‌سازی انتشار CO_2 و SO_2 را افزایش دهد درحالی‌که NO_x را کاهش می‌دهد. با در نظر گرفتن بازارهای عمده‌فروشی امروزی، در تحقیق دیگری از قیمت‌های تاریخی برق و داده‌های انتشار حاشیه‌ای استفاده کردند تا نشان دهند که ذخیره انرژی انبوه به‌طور مداوم انتشار CO_2 سیستم برق ایالات‌متحده را افزایش می‌دهد (با انتشار SO_2 و NO_x به‌طورکلی) اگر برای به حداکثر رساندن درآمد مورداستفاده قرار گیرد. در کارهای بعدی، استراتژی‌های عملیاتی جایگزین برای ذخیره‌سازی شناسایی شد که می‌تواند انتشارات ناشی از ذخیره‌سازی را با هزینه کم کاهش یا حذف کند و انتشارات ناشی از ذخیره‌سازی با مقدار نسبتاً کمی باد و خورشید موردنیاز برای جبران آن‌ها مقایسه شد.

برای ذخیره‌سازی توزیع‌شده با استفاده از رویکرد انتشار حاشیه‌ای، در تحقیقی از مصرف در سطح خانوار و داده‌های تولید خورشیدی استفاده کردند تا مشخص کنند که ارسال انرژی خورشیدی به شبکه برای محیط‌زیست مفیدتر از ذخیره انرژی در دستگاه‌های ذخیره‌سازی خانگی است، عمدتاً به دلیل تلفات بهره‌وری عملکرد ذخیره‌سازی توزیع‌شده را در سه حالت عملیاتی مختلف در ۱۶ شرکت آب و برق ایالات‌متحده مطالعه کرد و نتیجه گرفت که ذخیره‌سازی می‌تواند برای کاهش انتشار CO_2 یا کاهش صورتحساب مشتری استفاده شود، اما به‌ندرت هر دو در یک زمان استفاده می‌شود. مقاله‌ی دیگری ذخیره‌سازی توزیع‌شده تحت کنترل جمع‌آوری را در نظر می‌گیرد و از یک مدل باتری پیچیده (شامل بهینه‌سازی هم‌زمان جریان‌های درآمدی متعدد مانند آربیتراژ، کاهش هزینه‌های تقاضا، تنظیم فرکانس و ذخیره چرخش) استفاده می‌کند تا به نتایج مشابهی برسد: ذخیره‌سازی حداکثر سود. انتشار گازهای گلخانه‌ای سیستم را افزایش می‌دهد، اما این اثر را می‌توان با طراحی تعرفه متفکرانه کاهش داد.

استفاده از مدل‌های سیستم برق به‌جای داده‌های تاریخی تا حدی دقت را کاهش می‌دهد، اما به محققان اجازه می‌دهد تا به مجموعه گسترده‌تری از سؤالات، به‌ویژه آن‌هایی که مربوط به استقرار ذخیره‌سازی در مقیاس بزرگ در شبکه‌های آینده با ترکیب‌های تولیدی متفاوت هستند، پاسخ دهند. تحقیقی مدلی از شبکه PJM را برای مطالعه اثرات غیرحاشیه‌ای ۲۰ گیگاوات ذخیره‌سازی جدید توسعه دادند و دریافتند که افزودن ذخیره‌سازی باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در تحقیقی دیگر از سیستم‌های آزمایشی 9-bus و 30-bus برای مطالعه اثر ذخیره‌سازی جدید استفاده شد که ذخایر سیستم قدرت را با و بدون کلاهک انتشار برای ژنراتورهای زغال‌سنگ ارائه می‌کند. با درپوش آلایندگی، ذخیره‌سازی بیش‌ازحد کار می‌کند و انتشار گازهای گلخانه‌ای از سوخت‌های دیگر را افزایش می‌دهد. بدون سقف انتشار زغال‌سنگ، ذخیره‌سازی ممکن است به دلیل ظرفیت ذخیره، یعنی فضای ذخیره‌سازی که با انرژی‌های تجدیدپذیر پر نمی‌شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش دهد. مقاله دیگری تأثیر افزودن ذخیره‌سازی به شبکه برق تگزاس را درحالی‌که اهداف کربن‌زدایی را تا سال ۲۰۴۵ دنبال می‌کند، بررسی می‌کنند و به این نتیجه می‌رسند که ذخیره‌سازی جدید امروزه انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد، اما ممکن

[۱] Carson & Novan

است تا سال ۲۰۲۵ معکوس شود. تجزیه‌وتحلیل یک سؤال مشابه را برای اپراتور سیستم مستقل قاره میانی[۱] با استفاده از روش‌های مختلف دنبال می‌کند و به این نتیجه می‌رسد که پس از نصب ۲۰ گیگاوات انرژی بادی یا خورشیدی اضافی در سراسر MISO، ذخیره‌سازی شروع به کاهش انتشار خواهد کرد[۱-۳].

۳-۵- هزینه تراز شده ذخیره‌سازی انرژی (LCOS)

این آنالیز برای سیستم‌های باتری لیتیومی، سرب اسید و وانادیومی برای سطوح مختلف توان و نسبت انرژی بر توان انجام شده است. برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با باتری (BESS)، سطوح توان۰٫۱، ۱، ۱۰، و ۱۰۰ مگاوات با ماندگاری ۴ ساعت مد نظر قرار گرفته است[۴-۸].

۳-۵-۱- مفاهیم اجزای هزینه و معیار عملکرد:

برای شکستن هزینه‌ها بهترین راحت تعیین هزینه اجزا ا ست. عدم انجام این مهم باعث سوء بردا شت از اطلاعات ارائه شده می‌گردد. در ادامه مفاهیم هر یک از اجزا هزینه ارائه شده است.

هزینه اجزای نصب شده سیستم ذخیره‌سازی انرژی (ESS)

- بلوک ذخیره‌سازی (SB) ($/kwh) این جزء شامل هزینه برای اکثر اجزای ذخیره‌سازی جریان مستقیم پایه در ESS (برای مثال در باتری لیتیومی، این هزینه شامل ماژول باتری، قفسه، سیستم مدیریت باتری و قابل مقایسه با هزینه پک خودرو برقی) است.
- سایر اجزا ذخیره‌سازی (SBOS) ($/kwh) شامل اجزا تامین بلوک ذخیره‌سازی از جمله محفظه، کابل‌کشی، سوئیچ‌گیر، پمپ‌های باتری جریانی، و گرمایش و تهویه هوا (HVAC)
- سیستم ذخیره‌سازی ($/kwh) این هزینه مجموع هزینه‌های بلوک و سایر اجزا ذخیره‌سازی است.
- تجهیزات توان ($/kwh): این جزء شامل اینورتور دوطرفه، اینورتور DC-DC، عایق محافظت، مدارشکن جریان مستقیم (AC)،

---

[۱] MISO

رله‌ها، رابط ارتباطی، و نرم‌افزار. این بخش شامل سیستم تبدیل توان برای باتری‌ها، مرکز قوای محرکه در PSH و راه‌شگر یا جزیره توان در CAES است.

- کنترلرها و ارتباطات (C&C) ($/kw): این شامل سیستم مدیریت انرژی در کلیه ESS هاست و مسئول عملکرد ESS است. این ممکن است همچنین شامل هزینه‌های مجوز سالانه نرم‌افزارها باشد. این هزینه معمولا به عنوان هزینه‌ای ثابت از توان و فارغ از ماندگاری بیان می‌شود.

- ادغام سیستم: ($/kwh): هزینه شارژ شده توسط یکپارچه‌ساز برای ادغام کردن اجزای BESS به یک سیستم تک تابعی است. این وظیفه شامل خرید و حمل به سایت ماژول باتری، قرارگیری قفسه‌ها با کابل‌کشی، محفظه‌ها، و اجزای توان است. در محل سایت، ماژول‌ها و قفسه‌ها بوسیله سیستم‌های گرمایش و تهویه هوا و اتفای حریق و برق لازم جهت عملکرد سیستم اصلی تجهیز شده است.

- مهندسی، خرید و ساخت (EPC) ($/kwh): شامل هزینه‌های مهندسی غیردائمی و تجهیزات ساخت به همراه هزینه جابجایی، قرارگیری و نصب ESS است. این هزینه بر حسب نسبت انرژی بر توان وزن‌دهی می‌شود.

- توسعه پروژه ($/kw): هزینه‌های مرتبط با صدور مجوز، قراردادهای خرید برق، قراردادهای اتصال به شبکه، کنترل سایت و تامین بودجه

- ادغام شبکه ($/kw): هزینه‌های مستقیم مرتبط با اتصال ESS به شبکه شامل هزینه تبدیل، اندازه‌گیری، و مدارشکن‌های عایق.

هزینه‌های عملیاتی

- هزینه ثابت بهره‌برداری و نگهداری (O&M) ($/kwh): شامل همه هزینه‌های لازم برای اینکه سیستم ذخیره‌سازی برای طول عمر مفیدش قابل بهره‌برداری باشد که بر اساس توان عملیاتی نوسان نکند مانند نگهداری پیش‌بینی شده، قطعات، حقوق و مزایای پرسنل. این بخش ممکن است شامل تعمیر و نگهداری مرتبط با پیاده و سوار کردن سیستم وابسته به توان عملیاتی نیز باشد.

- هزینه متغیر اصلی بهره‌برداری و نگهداری (O&M) ($/Mwh): شامل هزینه‌های وارد شده مرتبط با مواد مصرفی ضروری غیر سوختی برای بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌سازی در طول عمر مفیدش.

- تلفات بازدهی رفت و برگشتی (RTE) ($/kwh): بازدهی رفت و برگشتی عبارتست از سهم انرژی تحویل شده به شبکه به انرژی لازم برای شارژ ESS به همان سطح انرژی. RTE بدلیل وجود تلفات مرتبط با مدیریت حرارت، تلفات الکتروشیمیایی، تلفات تبدیل توان، تبخیر، تلفات نشتی هوا/گاز همیشه زیر ۱ است. مقدار تلفات RTE بر اساس اضافه برق یا سوخت خریداری

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

شده بر واحد kwh انرژی دشارژ شده به دلیل تلفات ارائه شده در بالاست.

۳-۵-۲- محاسبه LCOS

هزینه‌های هر یک از فناوری‌ها با ا ستفاده از منابع مختلف بین‌المللی و در برخی موارد قیمت‌های اعلام شده تو سط تامین‌کنندگان خارجی است. البته برای فناوری‌هایی که امکان تولید در کشور وجود دارد سعی شده است استعلام قیمت از تامین‌کنندگان داخلی نیز انجام شود.

$$LCOS = \frac{TIC\left(\frac{r}{1-(1+r)^{-N}}\right)}{\sum_{t=0}^{t} kWh_{dis,t}} + \frac{\sum_{t=0}^{8760} P_t}{t.\ \eta_{RTE}} + C_{O\&M}$$

TIC: هزینه کل سیستم نصب شده

r: نرخ تنزیل

N: عمر سیستم بر حسب سال

kWh_{dis}: ظرفیت دشارژ کل سیستم در یک سیکل شارژ/دشارژ

$P_{elec,t}$: متوسط قیمت برق عمده

t: ساعت (۸۷۶۰ در سال)

η_{RTE} : بازدهی رفت و برگشتی

O&M: هزینه ثابت بهره‌برداری و نگهداری $/kWh

هزینه‌های هر یک از فناوری‌های باتری لیتیومی NMC و LFP، باتری سرب–اسید، جریانی وانادیومی و آهنی برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۳۰ در جداول ۳–۱ تا ۳–۵ ارائه شده ا ست. مقادیر مذکور مربوط به قیمت‌های جهانی ا ست. در ادامه و در جداول ۳–۶ تا ۳–۱۰ مقادیر برای باتری‌های لیتیومی و سرب–اسیدی در ایران برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۳۰ است. لازم بذکر است برای ایران دو سناریو مورد بررسی قرار گرفته که در یکی سلول‌های لیتیومی تولیدی ایرانی مدنظر قرار گرفته است و در سناریوی دیگر با استفاده از سلول‌های خارجی و پکینگ در ایران مدنظر است. فرض شده است برای تهیه سلول‌ها، حداقل هزینه گمرکی و تنها سود بازرگانی مدنظر قرار گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

جدول ۳-۱- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت

100MW/4h	100MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	1MW/4h	1MW/4h	100Kw/4h	100Kw/4h		
2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	واحد	
99	164	104	172	109	181	119	192	$/kWh	بلوک ذخیره سازی
27	38	28	40	30	42	32	44	$/kWh	سایر اجزای ذخیره سازی
54	63	63	73	73	84	83	94	$/kW	تجهیزات توان
1	2	5	8	28	39	56	68	$/kW	کنترلرها و ارتباطات
36	41	38	44	41	47	45	52	$/kWh	ادغام سیستم
43	53	46	56	50	60	55	65	$/kWh	مهندسی، خرید و ساخت (EPC)
52	62	55	66	60	72	67	80	$/kWh	توسعه پروژه
16	19	20	24	25	30	31	36	$/kW	ادغام شبکه
275	379	293	404	322	440	361	483	$/kWh	کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی
1099	1516	1172	1617	1286	1761	1442	1930	$/kW	کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی
3/1	3/7	3/3	4	3/6	4/3	3/9	4/6	$/kW-yr	هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری
0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	$/MWh	هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری
0/004	0/005	0/004	0/005	0/004	0/005	0/004	0/005	$/kWh	تلفات بازدهی رفت و برگشتی
0/88	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	%	بازدهی رفت و برگشت
1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	s	زمان پاسخدهی
2150	2000	2150	2000	2150	2000	2150	2000	#	عمر سیکلی
10	10	10	10	10	10	10	10	yrs	عمر Calendar
6/2	5/8	6/2	5/8	6/2	5/8	6/2	5/8	yrs	مدت بر حسب عمر سیکلی
100000	100000	10000	10000	1000	1000	100	100	kw	ظرفیت
0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	$	قیمت برق

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/128	0/123	0/127	0/122	0/126	0/121	0/126	0/121

جدول ۳-۲- هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	182	119	193	116	184	111	175	106
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	34	32	36	26	40	25	34	24
تجهیزات توان	$/kW	95	83	84	68	73	59	63	54
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	68	56	39	28	8	5	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	52	45	47	41	44	39	43	37
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	67	55	62	51	56	47	53	44
توسعه پروژه	$/kWh	81	67	74	62	66	57	65	53
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	466	361	450	326	416	300	391	282
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	1863	1442	1801	1305	1665	1200	1564	1127
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	4/9	4/1	4/5	3/7	4/1	3/4	3/9	3/2
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/005	0/004	0/005	0/004	0/005	0/004	0/005	0/004
بازدهی رفت و برگشت	%	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300
عمر Calendar	yrs	10	10	10	10	10	10	10	10
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	3/5	3/7	3/5	3/7	3/5	3/7	3/5	3/7

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/138	0/129	0/138	0/128	0/136	0/127	0/135	0/126

جدول ۳-۳- هزینه باتری سرب اسید با زمان تخلیه ۴ ساعت

	100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	190	176	181	167	172	159	163	151
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	50	38	48	35	47	33	44	31
تجهیزات توان	$/kW	178	149	155	125	132	114	115	92
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	68	56	39	28	8	5	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	50	42	47	39	43	36	41	34
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	55	41	52	43	49	40	46	38
توسعه پروژه	$/kWh	73	62	67	55	61	51	58	47
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	489	418	451	384	413	354	386	328
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	1954	1672	1804	1534	1652	1415	1544	1313
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	6/4	5/5	5/9	4/9	5/4	4/5	5/1	4/2
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/008	0/005	0/008	0/005	0/008	0/005	0/008	0/005
بازدهی رفت و برگشت	%	0/79	0/79	0/79	0/79	0/79	0/79	0/79	0/79
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	740	740	740	740	740	740	740	740

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

عمر Calendar	yrs	12	12	12	12	12	12	12	12
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/180	0/172	0/176	0/169	0/172	0/165	0/169	0/163

جدول ۳-۴- هزینه باتری جریانی وانادیومی با زمان تخلیه ۴ ساعت

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	300	236	288	223	275	213	260	202
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	61	43	58	40	55	39	52	37
تجهیزات توان	$/kW	176	146	154	125	132	107	115	92
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	68	56	39	28	8	5	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	57	49	54	45	51	42	47	39
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	67	58	62	52	57	48	54	45
توسعه پروژه	$/kWh	86	74	79	66	72	60	67	56
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	641	518	597	471	551	435	514	406
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	2564	2073	2387	1882	2204	1740	2056	1625
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	7/3	6/1	6/8	5/6	6/3	5/1	5/9	4/8
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014
بازدهی رفت و برگشت	%	0/68	0/68	0/68	0/68	0/68	0/68	0/68	0/68

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200
عمر Calendar	yrs	15	15	15	15	15	15	15	15
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/158	0/157	0/157	0/156	0/157	0/156	0/156	0/156

جدول ۳-۵- هزینه باتری جریانی آهنی با زمان تخلیه ۴ ساعت

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	228	132	218	161	208	125	198	113
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	61	43	58	40	55	39	52	37
تجهیزات توان	$/kW	176	146	154	125	132	107	115	92
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	68	56	39	28	8	5	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	57	49	54	45	51	42	47	39
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	67	58	62	52	57	48	54	45
توسعه پروژه	$/kWh	86	74	79	66	72	60	67	56
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	569	414	527	409	484	347	452	317
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	2276	1657	2107	1634	1936	1388	1808	1269
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	7/3	4/9	6/8	5	6/3	3/8	5/9	3

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014	0/0014
بازدهی رفت و برگشت	%	0/75	0/85	0/75	0/85	0/75	0/85	0/75	0/85
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200	5200
عمر Calendar	yrs	15	15	15	15	15	15	15	15
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0	15/0
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/143	0/127	0/143	0/126	0/143	0/126	0/143	0/126

جدول ۳-۶- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول تولید ایران

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	310	201	283	191	270	181	260	169
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	53	38	50	43	48	34	46	32
تجهیزات توان	$/kW	108	95	97	84	84	72	72	62
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	78	64	45	32	9	6	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	52	45	47	41	44	38	41	36
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	49	41	45	37	42	34	40	32
توسعه پروژه	$/kWh	60	50	54	45	49	41	46	39
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	579	423	522	393	482	353	456	328

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

1311/3	1825/6	1412/19	1929/93	1570/05	2086/13	1691/63	2315/85	$/kW	کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی
2/6	3/1	2/8	3/4	3/1	3/7	3/3	3/9	$/kW-yr	هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری
0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	$/MWh	هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری
0/003	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	$/kWh	تلفات بازدهی رفت و برگشتی
0/82	0/80	0/82	0/80	0/82	0/80	0/82	0/80	%	بازدهی رفت و برگشت
1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	s	زمان پاسخدهی
1600	1450	1600	1450	1600	1450	1600	1450	#	عمر سیکلی
10	10	10	10	10	10	10	10	yrs	عمر Calendar
4/6	4/2	4/6	4/2	4/6	4/2	4/6	4/2	yrs	مدت بر حسب عمر سیکلی
100000	100000	10000	10000	1000	1000	100	100	kw	ظرفیت
0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	$	قیمت برق
0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	%	نرخ تنزیل
0/132	0/141	0/133	0/142	0/134	0/143	0/135	0/145	$/kwh	LCOS

جدول ۳-۷- هزینه باتری لیتیومی LFP با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول خارجی پکینگ در ایران

100MW/4h	100MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	1MW/4h	1MW/4h	100 Kw/4 h	100 Kw/4 h		
2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	واحد	
119	193	124	199	129	208	140	220	$/kWh	بلوک ذخیره سازی
32	46	34	48	43	50	38	53	$/kWh	سایر اجزای ذخیره سازی
62	72	72	84	84	97	95	108	$/kW	تجهیزات توان
1	2	6	9	32	45	64	78	$/kW	کنترلرها و ارتباطات
36	41	38	44	41	47	45	52	$/kWh	ادغام سیستم

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	49	41	45	37	42	34	40	32
توسعه پروژه	$/kWh	60	50	54	45	49	41	46	39
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	489	362	447	331	411	296	389	278
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	1955/85	1447/63	1786/13	1322/05	1645/93	1184/19	1557/6	1111/3
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	3/9	3/3	3/7	3/1	3/4	2/8	3/1	2/6
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003
بازدهی رفت و برگشت	%	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	2000	2150	2000	2150	2000	2150	2000	2150
عمر Calendar	yrs	10	10	10	10	10	10	10	10
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	5/8	6/2	5/8	6/2	5/8	6/2	5/8	6/2
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/128	0/122	0/127	0/121	0/126	0/121	0/126	0/121

جدول ۳–۸– هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول تولید ایران

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	240	158	226	147	218	141	212	137
سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	53	38	50	43	48	34	46	32
تجهیزات توان	$/kW	108	95	97	84	84	72	72	62

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

کنترلرها و ارتباطات	$/kW	78	64	45	32	9	6	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	52	45	47	41	44	38	41	36
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	49	41	45	37	42	34	40	32
توسعه پروژه	$/kWh	60	50	54	45	49	41	46	39
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	509	380	465	349	430	313	408	296
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	2035/85	1519/63	1858/13	1394/05	1721/93	1252/19	1633/6	1183/3
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	4/6	3/9	4/3	3/6	4	3/3	3/7	3/1
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003
بازدهی رفت و برگشت	%	0/80	0/82	0/80	0/82	0/80	0/82	0/80	0/82
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	900	1000	900	1000	900	1000	900	1000
عمر Calendar	yrs	10	10	10	10	10	10	10	10
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	2/6	2/9	2/6	2/9	2/6	2/9	2/6	2/9
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/164	0/146	0/160	0/144	0/158	0/142	0/156	0/141

جدول ۳-۹- هزینه باتری لیتیومی NMC با زمان تخلیه ۴ ساعت با سلول خارجی پکینگ در ایران

		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h
	واحد	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030
بلوک ذخیره سازی	$/kWh	220	155	208	145	198	138	192	132

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

سایر اجزای ذخیره سازی	$/kWh	53	38	50	43	48	34	46	32
تجهیزات توان	$/kW	108	95	97	84	84	72	72	62
کنترلرها و ارتباطات	$/kW	78	64	45	32	9	6	2	1
ادغام سیستم	$/kWh	52	45	47	41	44	38	41	36
مهندسی، خرید و ساخت (EPC)	$/kWh	49	41	45	37	42	34	40	32
توسعه پروژه	$/kWh	60	50	54	45	49	41	46	39
ادغام شبکه	$/kW	36	31	30	25	24	20	19	16
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kWh	489	377	447	347	410	310	388	291
کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی	$/kW	1955/85	1507/63	1786/13	1386/05	1641/93	1240/19	1553/6	1163/3
هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری	$/kW-yr	4/6	3/9	4/3	3/6	4	3/3	3/7	3/1
هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری	$/MWh	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43	0/43
تلفات بازدهی رفت و برگشتی	$/kWh	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003	0/004	0/003
بازدهی رفت و برگشت	%	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88	0/86	0/88
زمان پاسخدهی	s	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4
عمر سیکلی	#	1200	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1300
عمر Calendar	yrs	10	10	10	10	10	10	10	10
مدت بر حسب عمر سیکلی	yrs	3/5	3/7	3/5	3/7	3/5	3/7	3/5	3/7
ظرفیت	kw	100	100	1000	1000	10000	10000	100000	100000
قیمت برق	$	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
نرخ تنزیل	%	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
LCOS	$/kwh	0/139	0/130	0/137	0/128	0/136	0/127	0/135	0/126
		100Kw/4h	100Kw/4h	1MW/4h	1MW/4h	10MW/4h	10MW/4h	100MW/4h	100MW/4h

جدول ۳-۱۰- هزینه باتری سرب-اسیدی با زمان تخلیه ۴ ساعت تولیدی ایران

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

2030	2021	2030	2021	2030	2021	2030	2021	واحد	
125	130	128	132	132	135	136	140	$/kWh	بلوک ذخیره سازی
39	55	41	59	44	60	48	63	$/kWh	سایر اجزای ذخیره سازی
115	144	143	165	156	194	186	223	$/kW	تجهیزات توان
1	3	6	10	35	49	70	85	$/kW	کنترلرها و ارتباطات
32	38	34	40	37	44	39	47	$/kWh	ادغام سیستم
36	43	38	46	40	49	38	52	$/kWh	مهندسی، خرید و ساخت (EPC)
44	54	48	57	52	63	58	68	$/kWh	توسعه پروژه
16	19	20	24	25	30	31	36	$/kW	ادغام شبکه
308	362	331	384	358	419	391	455	$/kWh	کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی
1233/5	1449	1322	1535/75	1433	1675	1565	1821	$/kW	کل هزینه نصب سیستم ذخیره سازی
3/4	4/1	3/6	4/3	3/9	4/7	4/4	5/1	$/kW-yr	هزینه ثابت بهره برداری و نگهداری
0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	$/MWh	هزینه متغیر بهره برداری و نگهداری
0/004	0/006	0/004	0/006	0/004	0/006	0/004	0/006	$/kWh	تلفات بازدهی رفت و برگشتی
0/75	0/72	0/75	0/72	0/75	0/72	0/75	0/72	%	بازدهی رفت و برگشت
1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	1 to 4	s	زمان پاسخدهی
740	740	740	740	740	740	740	740	#	عمر سیکلی
12	12	12	12	12	12	12	12	yrs	عمر Calendar
2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	2/1	yrs	مدت بر حسب عمر سیکلی
100000	100000	10000	10000	1000	1000	100	100	kw	ظرفیت
0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	$	قیمت برق
0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	%	نرخ تنزیل
0/167	0/178	0/169	0/181	0/172	0/184	0/176	0/188	$/kwh	LCOS

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۳-۶- نتیجه‌گیری

هزینه‌های ذخیره‌سازی برای سیستم‌های برگزیده برای ذخیره‌سازی سریع (باتری‌های لیتیومی، سرب–اسیدی و جریانی) برای سال ۲۰۲۱ و سال ۲۰۳۰ با توجه به اطلاعات موجود و استعلام‌های بین‌المللی و داخلی انجام شد. نتایج نشان داد که هزینه LCOS برای باتری‌های لیتیومی LFP و NMC کمتر از سایر فناوری‌ها در سال ۲۰۲۱ و ۲۰۳۰ است. به نظر می‌رسد باتری‌های لیتیومی بهترین گزینه برای بحث ذخیره‌سازی در مقیاس ۱۰۰ کیلووات تا ۱۰ مگاوات از منظر هزینه است. البته لازم بذکر است فناوری باتری‌های جریانی آهنی که به تازگی معرفی شده‌اند نیز امکان رقابت در آینده را با باتری‌های لیتیومی خصوصا در سیستم‌های مقیاس بالا داشته باشد. باتری‌های سرب–اسید قابل رقابت با فناوری باتری‌های لیتیومی در دنیا نیستند. از سوی دیگر در ایران شرایط کمی متفاوت است. لازم بذکر است در ایران با دو سناریوی سلول تولید داخل و سلول خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که باتری‌های لیتیومی با سلول خارجی از منظر اقتصادی به صرفه‌تر هستند. در صورت استفاده از سلول‌های ایرانی یا حقوق گمرکی بالای سلول باتری لیتیومی، باتری‌های سرب–اسید قابلیت رقابت با باتری‌های لیتیومی را در حال حاضر دارند ولی در بلند مدت بازهم باتری‌های لیتیومی بهترین گزینه هستند. در نهایتر همانگونه که پیشتر پیش‌بینی می شد افزایش ظرفیت باعث کاهش LCOE در همه سیستم‌ها شد که البته این کاهش چندان قابل توجه نبود.

۳-۷- مراجع:

[1] Cole, Wesley, A. Will Frazier, and Chad Augustine. 2021. Cost Projections for UtilityScale Battery Storage: 2022 Update. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A20-79236.

[2] A.G.Olabi, Mohammad Ali Abdelkareem, Tabbi Wilberforce, Enas Taha Sayed.Application of graphene in energy storage device – A review. Renewable and Sustainable, Energy Reviews, 135, 2021,

[3] Xu Y, Pei J, Cui L, Liu P and Ma T (2022) The Levelized Cost of Storage of Electrochemical Energy Storage Technologies in China. *Front. Energy Res.* 10:873800.

[4] K. Mongird, V. Viswanathan, C. Vartanian, V. Sprenkle, R. Baxter,(2020), Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, Technical Report, DOE/PA-0204.

[5] Dahn, J. (2020). An Unavoidable Challenge for Ni-Rich Positive Electrode Materials for Li-Ion Batteries. Paper presented at the International Battery Seminar & Exhibit 2020.

[6] De-Leon, S. (2020). Lithium-ion battery recycling market 2019-2020. Paper presented at the International Battery Seminar & Exhibit 2020 .

[7] Feldman, David, Vignesh Ramasamy, Ran Fu, Ashwin Ramdas, Jal Desai, and Robert Margolis. 2021. "U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020." NREL/TP-6A20-77324. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

[8] EIA. 2021. "Annual Energy Outlook 2021." Energy Information Administration. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فصل ۴: بررسی عملکرد هزینه تراز شده انرژی باتری لیتیومی در مقایسه با دیزل ژنراتور جهت اتصال به شبکه

۴-۱- مقدمه

محققان و متخصصان انرژی بر این باورند که آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی بزرگترین تهدید برای آینده بشریت می‌باشد، و جهان باید به سمت تکنولوژی‌های جدید و پاک سوق داده شود. امروزه بسیاری از صنایع به استفاده از تکنولوژی های بدون دی‌اکسید کربن روی آورده اند. در حال حاضر، اداره و تأمین مصرف انرژی انسان ها معمولا توسط ژنراتورهای متصل یا غیر متصل به شبکه انجام می شوند. سوخت این ژنراتور ها معمولا از سوخت های فسیلی تأمین می شوند که کربن دی اکسید تولید کرده و منجر به آلودگی هوا و آسیب‌های محیط زیستی می‌شود. در حال حاضر، سیاست دولت‌ها به سمت کربن‌زدایی متمایل شده اند. این امر مستلزم تولید برق توسط تکنولوژی های پاک و جدید می‌باشد که مقدار کربن ساطع شده کاهش یابد. بر این اساس، سیاست‌های جهانی به شدت بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی پاک و سبز متمرکز است. دستگاه‌های ذخیره انرژی نقش به سزایی در ذخیره، مدیریت، بهبود کارایی و انتقال انرژی‌های پاک حاصل از انرژی های تجدید پذیر دارند. تضمین تأمین قابل اطمینان انرژی، پایدار بودن و تأمین انرژی با قیمت مناسب، سه هدف اصلی ریز شبکه های پاک برای تولید برق با حداقل آلودگی می‌باشند. با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر بجای انرژی های فسیلی برای تولید برق جهت کاهش گاز های گلخانه‌ای و دی‌اکسید کربن بدون در نظر گرفتن جوانب اقتصادی و محاسبه پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر، امکان پذیر نمی‌باشد. پس علاوه بر قابل اطمینان بودن و پایدار بودن سیستم هایی که از انرژی تجدیدپذیر استفاده میکنند، مشخص کردن اندازه هر یک از بخش های ریزشبکه های سبز نیز دارای اهمیت است. بنابراین هزینه‌های محیط زیستی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برای تولید برق از اهمیت ویژه‌ای در دنیا برخوردار شده است[۱-۳].

نتایج ارائه شده در فصل پیش، باتری‌های لیتیومی به عنوان بهترین گزینه از منظر اقتصادی و فنی به عنوان سیستم ذخیره سازی انرژی شناخته می‌شود. بنابراین در این فصل به بررسی باتری‌های لیتیومی برای کاربرد در شبکه برق کشور می‌پردازیم. بدین منظور در ابتدا برای استفاده از سیستم‌های ذخیره سازی باتری لیتیومی برای شیفت پیک به عنوان جایگزینی برای تاسیس نیروگاه جدید و یا استفاده از دیزل ژنراتور بررسی می‌گردد. لازم بذکر است در این بخش هزینه انتشار دی‌اکسید کربن نیز مدنظر قرار داده خواهد شد.

۴-۲- هزینه تراز شده انرژی

در این بخش به بررسی هزینه تراز شده انرژی(LCOE)باتری‌های لیتیومی با دیزل ژنراتور و نیروگاه‌های سیکل ترکیبی مقایسه خواهد شد[۲].

$$LCOE = \Sigma[(I_t + M_t + F_t) / (1 + r)^t] / \Sigma[(E_t/(1 + d)^t]$$

که در آن:

I: هزینه اولیه سرمایه‌گذاری

M: هزینه عملیاتی و نگهداری

F: هزینه سوخت

r : نرخ تنزیل

d: نرخ افت عملکرد

E: کل الکتریسیته تولید شده

t: عمر سیستم

با توجه به نتایج فصل قبل، این مقادیر برای باتری‌های لیتیومی با قابلیت دشارژ ۴ ساعته برای سیستم ۱۰ مگاواتی در دو صورت استفاده از برق خورشیدی و همچنین برق نیروگاه CHP به شکل زیر قابل دستیابی است:

سال ۲۰۲۱

باتری لیتیومی با کاتد LFP با برق خورشیدی (برق خورشیدی به ازای هر کیلووات ساعت ۴,۵ سنت فرض شد)

$LCOE= [(16,459,000+ 213,000+ 3,810,600) / (1+0.1)^{5.8}] / [72,825/ (1+0.1)^{5.8}]$

LCOE= **281 $/MWh**

باتری لیتیومی با کاتد LFP با برق نیروگاه CHP (برق CHP به ازای هر کیلووات ساعت ۲,۵ سنت فرض شد)

$LCOE= [(16,459,000+ 213,000+2,117,000) / (1+0.1)^{5.8}] / [72,825/ (1+0.1)^{5.8}]$

LCOE= **258 $/MWh**

این مقادیر برای دیزل ژنراتور ۱۰ مگاواتی با فرض ۴ ساعت کار روزانه به عبارت ذیل است

سوخت گازوئیل (با فرض دیزل ژنراتورهای معمول با عمر ۱۵۰۰۰ ساعت و متو سط قیمت گازوئیل خلیج فارس ۱,۵۲ دلار به ازای گالن و هزینه ۰,۱۳ $/kwh)

$LCOE= [(27,500,000+ 23,000+19,360,000) / (1+0.1)^{10.2}] / [150,000/ (1+0.08)^{10.2}]$ LCOE= **259 $/MWh**

سوخت بنزین (با فرض دیزل ژنراتورهای معمول با عمر ۱۵۰۰۰ ساعت و متوسط قیمت بنزین خلیج فارس ۱,۶۲ دلار به ازای گالن و هزینه

(۰,۱۴ $/kwh

LCOE= [(27,500,000+ 23,000+21,000,000) / $(1+0.1)^{10.2}$] / [150,000/ $(1+0.08)^{10.2}$] LCOE= **268 $/MWh**

پیش‌بینی سال ۲۰۳۰

باتری لیتیومی با کاتد LFP با برق خورشیدی (برق خورشیدی به ازای هر کیلووات ساعت ۲,۵ سنت فرض شد)

LCOE= [(11,841,900 + 183,000 + 2,117,000) / $(1+0.1)^{6.2}$] / [79,658/ $(1+0.1)^{6.2}$]

LCOE= **177 $/MWh**

باتری لیتیومی با کاتد LFP با برق نیروگاه CHP (برق CHP به ازای هر کیلووات ساعت ۳ سنت فرض شد)

LCOE= [(11,841,900 + 213,000 + 2,540,400) / $(1+0.1)^{6.2}$] / [79,658/ $(1+0.1)^{6.2}$]

LCOE= **181 $/MWh**

این مقادیر برای دیزل ژنراتور ۱۰ مگاواتی با فرض ۴ ساعت کار روزانه به عبارت ذیل است

سوخت گازوئیل (با فرض دیزل ژنراتورهای معمول با عمر ۱۸۰۰۰ ساعت و متو سط قیمت گازوئیل خلیج فارس ۱,۷۲ دلار به ازای گالن و هزینه ۰,۱۵ $/kwh)

LCOE= [(23,500,000+ 23,000+27,000,000) / $(1+0.1)^{12.3}$] / [180,000/ $(1+0.08)^{12.3}$] LCOE= **224 $/MWh**

سوخت بنزین (با فرض دیزل ژنراتورهای معمول با عمر ۱۸۰۰۰ ساعت و متوسط قیمت بنزین خلیج فارس ۱,۹۲ دلار به ازای گالن و هزینه ۰,۱۶ $/kwh)

LCOE= [(23,500,000 + 23,000 + 28,800,000) / $(1+0.1)^{12.3}$] / [180,000/ $(1+0.08)^{12.3}$] LCOE= **232 $/MWh**

این نتایج حاکی از آن است که استفاده از باتری‌های لیتیومی با مفروضات مطرح شده در فصل قبل نسبت به دیزل ژنراتور هزینه تراز شده انرژی بالاتری در حال حاضر دارد. البته لازم بذکر است هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای در این محاسبات در نظر گرفته نشده است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد این تناسب در سال‌های آتی تغییر خواهد کرد و در سال ۲۰۳۰ هزینه تراز شده انرژی با باتری لیتیومی در ایران کمتر از دیزل ژنراتور خواهد بود

میزان انتشار CO_2 برای هر یک از فناوری‌های باتری و دیزل ژنراتور در سال ۲۰۲۱ و ۲۰۳۰ در جدول ذیل ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

جدول ۴-۱- مقدار انتشار گاز CO_2 برای فناوری‌های مختلف

	۲۰۳۰	۲۰۲۱
باتری با نیروگاه خورشیدی	۲۰	۲۰
باتری با نیروگاه CHP جدید	۱۸،۲۱۲	۲۰،۱۳۰
باتری با نیروگاه CHP قدیمی	-	۳۹،۷۸۰
دیزل ژنراتور با گازوئیل	۱۲۵،۰۰۰	۱۲۷،۲۰۰
دیزل ژنراتور با بنزین	۱۱۱،۵۰۰	۱۱۰،۷۰۰

در ادامه و در جدول ذیل هزینه ترازشده فناوری‌های مختلف ۱۰ مگاوات با در نظر گرفتن هزینه انتشار گاز CO_2 ارائه می‌گردد.

جدول ۴-۲- هزینه تزار شده برای سیستم‌های مختلف بدون و با هزینه انتشار گاز

سیستم مورد بررسی	**LCOE ($/MWh)**			
	۲۰۳۰		**۲۰۲۱**	
	با در نظر گرفتن انتشار CO_2**	بدون در نظر گرفتن انتشار CO_2	با در نظر گرفتن انتشار CO_2*	بدون در نظر گرفتن انتشار CO_2
باتری با نیروگاه خورشیدی	۱۷۷	۱۷۷	۲۸۱	۲۸۱
باتری با نیروگاه CHP جدید	۲۲۸	۱۸۱	۲۶۰	۲۵۸
دیزل ژنراتور با گازوئیل	۲۹۴	۲۲۴	۲۶۶	۲۵۹
دیزل ژنراتور با بنزین	۲۹۴	۲۳۲	۲۷۳	۲۶۸

* هزینه متوسط انتشار هر تن CO_2 در سال ۲۰۲۱ معادل ۷،۶ دلار در نظر گرفته شد [۴]

** هزینه متوسط انتشار هر تن CO_2 در سال ۲۰۳۰ معادل ۱۰۰ دلار در نظر گرفته شد [۵]

۴-۳- پیک مصرف برق ۱۴۰۱

پیرو گزارش شرکت مدیریت شبکه برق [۶]، اطلاعات پیک مصرف از ابتدای خرداد ماه تا ابتدای شهریور ماه ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است پیک مصرف برق در تاریخ ۱۴۰۱/۵/۲۵ اتفاق افتاده است که میزان آن ۶۹۴۵۷ مگاوات بوده است.

جدول ۴-۳- پیک مصرف برق و ذخیره نیروگاهی در خرداد لغایت شهریور ۱۴۰۱

#	تاریخ	زمان	نیاز مصرف برق در پیک	نیاز مصرف برق در پیک (سال گذشته)	ذخیره نیروگاه ها	تولید تجدید پذیر (مجموع ۲۴ ساعت)	میانگین فرکانس
1	1401/06/01	20:40	61014	58905	812	7931	49.90
2	1401/06/01	15:08	63011	63705	868	7931	49.90
3	1401/05/31	20:49	61741	58741	850	7606	49.90
4	1401/05/31	15:14	64563	63646	717	7606	49.90
5	1401/05/30	21:04	62192	57683	1,005	7481	49.90
6	1401/05/30	15:25	65717	60938	857	7481	49.90
7	1401/05/29	21:16	63213	54230	589	7417	49.89
8	1401/05/29	15:13	66083	53555	343	7417	49.89
9	1401/05/28	21:03	60380	50209	801	6525	49.91
10	1401/05/28	14:32	60291	49608	693	6525	49.91
11	1401/05/27	21:01	63331	50818	599	6961	49.91
12	1401/05/27	15:16	67267	52939	699	6961	49.91
13	1401/05/26	20:58	65243	55056	652	7200	49.88
14	1401/05/26	15:20	68977	60361	389	7200	49.88
15	1401/05/25	21:08	66059	57248	428	5430	49.86
16	1401/05/25	15:11	69457	62671	647	5430	49.86
17	1401/05/24	21:01	65485	58579	628	4968	49.90
18	1401/05/24	14:36	68876	64785	656	4968	49.90
19	1401/05/23	21:12	64687	59620	758	5642	49.90
20	1401/05/23	15:26	67785	65834	702	5642	49.90
21	1401/05/22	21:08	63777	57119	580	7656	49.90
22	1401/05/22	15:18	67664	61136	347	7656	49.90
23	1401/05/21	21:10	61063	59090	420	7604	49.88
24	1401/05/21	14:30	60937	65493	853	7604	49.88
25	1401/05/20	21:20	63659	60227	885	7054	49.90
26	1401/05/20	15:11	67091	66119	603	7054	49.90
27	1401/05/19	20:55	63882	60487	884	7543	49.90
28	1401/05/19	15:09	66854	67012	916	7543	49.90

49.91	7936	890	60435	63864	20:53	1401/05/18	**29**
49.91	7936	842	65933	66035	15:20	1401/05/18	**30**
49.95	7183	784	60630	54989	21:01	1401/05/17	**31**
49.95	7183	489	65692	54085	15:37	1401/05/17	**32**
49.95	7237	794	60991	56461	21:03	1401/05/16	**33**
49.95	7237	681	65107	58082	15:13	1401/05/16	**34**
49.91	6831	701	56494	62555	20:53	1401/05/15	**35**
49.91	6831	726	58350	66284	14:20	1401/05/15	**36**
49.92	6667	664	57238	59537	21:23	1401/05/14	**37**
49.92	6667	762	62495	62432	14:35	1401/05/14	**38**
49.91	7080	779	58238	63592	21:06	1401/05/13	**39**
49.91	7080	748	63803	67744	15:10	1401/05/13	**40**
49.91	6025	848	57881	64075	21:25	1401/05/12	**41**
49.91	6025	724	62860	67515	15:12	1401/05/12	**42**
49.92	5886	887	57908	63249	20:55	1401/05/11	**43**
49.92	5886	749	63536	66538	15:15	1401/05/11	**44**
49.94	6213	882	57593	61705	21:17	1401/05/10	**45**
49.94	6213	630	63590	65139	15:10	1401/05/10	**46**
49.94	6838	794	57391	61150	21:07	1401/05/09	**47**
49.94	6838	771	62779	63717	15:21	1401/05/09	**48**
49.96	6619	944	53591	58577	21:19	1401/05/08	**49**
49.96	6619	820	53821	63478	14:44	1401/05/08	**50**
49.96	7354	791	54281	56979	21:38	1401/05/07	**51**
49.96	7354	703	55836	56382	14:56	1401/05/07	**52**
49.91	7273	815	57351	59157	21:30	1401/05/06	**53**
49.91	7273	902	64831	63471	15:42	1401/05/06	**54**
49.92	7268	1,130	60675	61755	21:27	1401/05/05	**55**
49.92	7268	786	66194	64011	14:42	1401/05/05	**56**
49.93	7487	533	61430	61268	21:20	1401/05/04	**57**
49.93	7487	791	66887	64096	15:45	1401/05/04	**58**
49.94	7581	925	60706	60864	21:10	1401/05/03	**59**
49.94	7581	849	64891	64350	15:44	1401/05/03	**60**
49.93	7951	866	60955	62353	21:21	1401/05/02	**61**
49.93	7951	598	65010	65704	15:20	1401/05/02	**62**
49.92	7596	788	57186	63828	21:17	1401/05/01	**63**
49.92	7596	1,074	59343	67036	15:15	1401/05/01	**64**
49.93	6571	1,392	58800	61716	21:36	1401/04/31	**65**
49.93	6571	784	62432	61366	14:54	1401/04/31	**66**
49.88	6823	864	57007		21:39	1401/04/30	**67**
49.88	6823	887	58710	67112	15:25	1401/04/30	**68**
49.88	7954	755	58474		21:38	1401/04/29	**69**
49.88	7954	635	64812	69277	15:18	1401/04/29	**70**
49.86	7302	818	59073	65385	21:20	1401/04/28	**71**
49.86	7302	707	64439	68937	15:22	1401/04/28	**72**

49.93	6785	716	57369	62726	21:12	1401/04/27	**73**
49.93	6785	616	63081	63340	15:00	1401/04/27	**74**
49.93	6515	743	56682	63753	21:13	1401/04/26	**75**
49.93	6515	771	61173	67741	15:11	1401/04/26	**76**
49.92	5683	472	51900	63971	21:13	1401/04/25	**77**
49.92	5683	240	54179	67371	16:19	1401/04/25	**78**
49.93	7711	827	54364	60867	21:48	1401/04/24	**79**
49.93	7711	784	60420	60481	14:04	1401/04/24	**80**
49.92	6962	472	57325	62034	21:19	1401/04/23	**81**
49.92	6962	791	63739	65792	16:07	1401/04/23	**82**
49.94	6785	873	58629	63235	21:13	1401/04/22	**83**
49.94	6785	767	64223	67346	16:18	1401/04/22	**84**
49.92	7245	777	58332	63929	21:44	1401/04/21	**85**
49.92	7245	307	64237	68107	16:14	1401/04/21	**86**
49.92	5460	874	58232	63423	21:29	1401/04/20	**87**
49.92	5460	723	63667	66300	16:44	1401/04/20	**88**
49.94	6192	776	57962	60139	21:58	1401/04/19	**89**
49.94	6192	766	63011	59315	15:15	1401/04/19	**90**
49.92	6826	737	54219	60487	21:13	1401/04/18	**91**
49.92	6826	674	56553	63445	16:14	1401/04/18	**92**
49.94	7313	662	56034	58141	21:39	1401/04/17	**93**
49.94	7313	479	63990	57199	14:49	1401/04/17	**94**
49.93	7436	589	60007		21:47	1401/04/16	**95**
49.93	7436	603	65118	58073	15:59	1401/04/16	**96**
49.95	7291	774	61423	60373	21:37	1401/04/15	**97**
49.95	7291	827	66290	62743	16:07	1401/04/15	**98**
49.96	7139	859	62793	59359	21:25	1401/04/14	**99**
49.96	7139	796	66257	62057	16:11	1401/04/14	**100**
49.94	6895	825	62359	59451	21:27	1401/04/13	**101**
49.94	6895	493	65918	62616	16:03	1401/04/13	**102**
49.94	7374	870	61892	60951	21:13	1401/04/12	**103**
49.94	7374	1,010	64278	63984	16:28	1401/04/12	**104**
49.93	8044	856	58181	62752	21:38	1401/04/11	**105**
49.93	8044	352	56997	67318	16:16	1401/04/11	**106**
49.95	7710	747	59382	60376	21:43	1401/04/10	**107**
49.95	7710	709	63254	60580	14:51	1401/04/10	**108**
49.94	7753	861	61614	61430	21:19	1401/04/09	**109**
49.94	7753	1,172	64319	65247	14:51	1401/04/09	**110**
49.94	7152	687	61714	62552	21:05	1401/04/08	**111**
49.94	7152	903	64434	66540	15:22	1401/04/08	**112**
49.94	5383	678	60841	62799	21:28	1401/04/07	**113**
49.94	5383	621	64046	66094	15:19	1401/04/07	**114**
49.93	5647	885	59723	61828	21:24	1401/04/06	**115**
49.93	5647	716	63298	65485	15:18	1401/04/06	**116**

49.94	6624	775	58712	61956	21:28	1401/04/05	**117**
49.94	6624	678	62081	65292	15:15	1401/04/05	**118**
49.93	5530	834	55360	61523	21:28	1401/04/04	**119**
49.93	5530	828	55777	64471	14:27	1401/04/04	**120**
49.95	5680	844	56170	57591	21:28	1401/04/03	**121**
49.95	5680	835	60770	58033	14:35	1401/04/03	**122**
49.94	5889	794	57800	59158	21:29	1401/04/02	**123**
49.94	5889	764	61634	62229	14:25	1401/04/02	**124**
49.93	5169	1,013	58373	60977	21:22	1401/04/01	**125**
49.93	5169	854	61425	63825	14:45	1401/04/01	**126**
49.93	5543	797	57200	60695	21:23	1401/03/31	**127**
49.93	5543	428	61385	63473	14:39	1401/03/31	**128**
49.93	7321	745	57339	60677	21:19	1401/03/30	**129**
49.93	7321	856	60601	62968	15:10	1401/03/30	**130**
49.94	7251	695	56773	60563	21:19	1401/03/29	**131**
49.94	7251	681	59923	62657	14:44	1401/03/29	**132**
49.96	6838	586	53554	60367	21:30	1401/03/28	**133**
49.96	6838	901	53682	62313	15:15	1401/03/28	**134**
49.95	6622	770	55917	56860	21:46	1401/03/27	**135**
49.95	6622	778	59399	56653	14:12	1401/03/27	**136**
49.97	7136	908	57068	58377	21:26	1401/03/26	**137**
49.97	7136	771	60464	60751	15:26	1401/03/26	**138**
49.96	5225	980	57507	59025	21:34	1401/03/25	**139**
49.96	5225	610	59274	62014	14:42	1401/03/25	**140**
49.96	5552	929	55985	58609	21:28	1401/03/24	**141**
49.96	5552	735	58478	60795	14:16	1401/03/24	**142**
49.97	5169	1,007	55674	58178	21:14	1401/03/23	**143**
49.97	5169	711	59001	60491	14:43	1401/03/23	**144**
49.98	5762	1,108	55402	57280	21:22	1401/03/22	**145**
49.98	5762	1,165	58034	59768	14:27	1401/03/22	**146**
49.97	7733	1,079	52250	56725	21:16	1401/03/21	**147**
49.97	7733	990	51467	58656	14:24	1401/03/21	**148**
49.98	6815	1,187	53704	54457	21:22	1401/03/20	**149**
49.98	6815	836	56720	53701	14:45	1401/03/20	**150**
49.94	5073	795	54932	57745	21:10	1401/03/19	**151**
49.94	5073	821	57566	59468	11:49	1401/03/19	**152**
49.95	6150	886	54087	57247	22:15	1401/03/18	**153**
49.95	6150	576	56854	59346	15:00	1401/03/18	**154**
49.95	5034	798	54812	58079	21:37	1401/03/17	**155**
49.95	5034	762	57803	59977	14:22	1401/03/17	**156**
49.95	3964	778	53564	57568	21:07	1401/03/16	**157**
49.95	3964	805	53693	59892	14:26	1401/03/16	**158**
49.98	2805	681	53285	53698	21:35	1401/03/15	**159**
49.98	2805	804	54042	53411	13:55	1401/03/15	**160**

161	1401/03/14	22:07	52135	51384	1,028	3010	49.97
162	1401/03/14	14:30	52436	51445	747	3010	49.97
163	1401/03/13	21:33	50297	54125	1,182	3259	49.98
164	1401/03/13	14:44	49946	57430	1,094	3259	49.98
165	1401/03/12	21:15	52140	56138	1,133	3486	49.98
166	1401/03/12	14:26	54494	58563	1,001	3486	49.98
167	1401/03/11	20:45	52674	54819	2,127	5734	49.97
168	1401/03/11	14:27	55133	57953	1,144	5734	49.97
169	1401/03/10	21:24	52254	53900	1,432	6168	49.99
170	1401/03/10	14:54	54341	56565	984	6168	49.99
171	1401/03/09	21:17	51534	53848	3,080	6140	50.00
172	1401/03/09	14:50	53639	56447	1,355	6140	50.00
173	1401/03/08	21:15	50760	53294	1,737	5676	49.99
174	1401/03/08	14:10	52218	55646	1,007	5676	49.99
175	1401/03/07	20:59	50720	48730	2,031	6817	50.00
176	1401/03/07	14:23	51704	47550	1,891	6817	50.00
177	1401/03/06	21:08	47206	49310	1,860	6905	49.99
178	1401/03/06	14:46	45333	48905	2,631	6905	49.99
179	1401/03/05	21:11	48678	49165	1,803	7746	49.98
180	1401/03/05	12:33	50389	49123	1,248	7746	49.98
181	1401/03/04	21:03	50065	50282	1,486	6375	49.99
182	1401/03/04	14:22	51474	54244	1,015	6375	49.99
183	1401/03/03	20:39	50551	53988	1,827	5955	49.98
184	1401/03/03	12:31	50886	55270	1,702	5955	49.98
185	1401/03/02	20:56	50837	54544	962	5105	49.98
186	1401/03/02	14:22	52408	55218	1,064	5105	49.98
187	1401/03/01	21:14	50150	53747	1,281	4679	49.98
188	1401/03/01	14:57	50215	55408	1,081	4679	49.98

نتایج حاکی از آن ا ست که میانگین پیک مصرف در این ۳ ماه عبارتست از ۶۰،۴۰۸ مگاوات که انحراف ۹۰۰۰ مگاواتی با مقدار پیک سال دارد. لازم بذکر است بیش از ۱۱۱ روز در این سه ماه مقدار مصرف بیش از مقدار پیک بوده است. همچنین ۳۷ روز مصرف بیش از ۶۵۰۰۰ مگاوات بوده است. بنابراین ذخیره‌سازی ۳۰۰۰ مگاوات در زمان کم‌باری توسط سیستم‌های ذخیره‌سازی برای مصرف در زمان پیک امکان شیفت پیک را فراهم می سازد. همچنین با توجه به افزایش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر به میزان ۱۰،۰۰۰ مگاوات، امکان ذخیره انرژی تولیدی و مصرف در زمان پیک بوجود می‌آید.

۴-۴- نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد استفاده از باتری‌های لیتیومی به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی، علاوه بر مزایای مطرح شده در فصول قبل،

در سال ۲۰۳۰ بدون در نظر گرفتن هزینه انتشار گازهای گلخانه‌ای از فناوری دیزل ژنراتور که در کشور استفاده می‌شود، از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است. لازم بذکر است در حال حاضر نیز این فناوری با دیزل ژنراتور از منظر اقتصادی قابل مقایسه است. در نظر گرفتن هزینه انتشار CO_2 باعث اختلاف نزدیک به ۴۰ درصدی بین ذخیره‌سازی باتری با انرژی خورشیدی و تولید برق توسط دیزل ژنراتور خواهد شد.

از سوی دیگر بررسی مصرف برق کشور در ۳ ماهه پرمصرف بار (۱۴۰۱/۳/۱ لغایت ۱۴۰۱/۶/۱) حاکی از مصرف پیک برق در تاریخ ۱۴۰۱/۵/۲۵ اتفاق افتاده است که میزان آن ۶۹۴۵۷ مگاوات بوده است. میانگین مصرف در سه ماهه مطرح شده حدود ۶۰۵۰۰ مگاوات بوده است که ۹۰۰۰ مگاوات از میزان پیک کمتر بوده است. همچنین متوسط برق کم‌باری در این سه ماه حدود ۴۳۰۰۰ مگاوات بوده است که این اختلاف پتانسیل خوبی برای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی در شبکه برق کشور فراهم می‌کند. در گام اول شاید بتوان با برنامه‌ای ۳ ساله و نصب ۱۰۰۰ مگاوات باتری لیتیومی، شیفت پیک برق در تابستان و نیازهای پاسخ سریع را تا حدودی بهبود بخشید.

۴-۵- مراجع:

[1] K. Mongird, V. Viswanathan, C. Vartanian, V. Sprenkle, R. Baxter,(2020), Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, Technical Report, DOE/PA-0204.

[2] Feldman, David, Vignesh Ramasamy, Ran Fu, Ashwin Ramdas, Jal Desai, and Robert Margolis. 2021. "U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020." NREL/TP-6A20-77324. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States).

[3] Muhammad Tamoor, Abdul Rauf Bhatti, Muhammad Farhan, Sajjad Miran, undefined, ECP 2022, 10.3390/ECP2022-12671, (2), (2022)

[4] https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=47256

[5] https://carboncredits.com/carbon-prices

[6] https://www.igmc.ir/Power-grid-status-report

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

فصل ۵: بررسی کاربرد ذخیره‌سازی سیار در شبکه با رویکرد بهبود پروفیل ولتاژ و پیک‌سایی در شبکه فوق توزیع

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۵-۱- مقدمه

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی یکی از ملزومات شبکه‌های هوشمند مدرن است. بر اساس نوع و کاربرد، مدت زمان شارژ و دشارژ ممکن است در حد چند ثانیه تا چند ماه طول بکشد. مدت زمان کوتاه‌تر ذخیره‌سازی در محدوده چند ثانیه تا چند دقیقه که همانطور که پیشتر مطرح شد به عنوان سیستم های ذخیره‌سازی سریع شناخته می‌شوند عبارتند از ابرخازن‌ها، ذخیره‌سازی انرژی ابررسانای مغناطیسی، ذخیره‌سازی انرژی فلایویل، و باتری‌های با دانسیته انرژی بالا. این‌ها معمولا برای کاربردهای کیفیت توان یا بهبود کیفیت ولتاژ و هموار شدن تغییرات منابع تجدیدپذیر ا ست. برای زمان‌های طولانی‌تر با باتری‌های با دان سیته توان بالا، تلمبه برق-آبی، CAES یا ذخیره سازی هیدروژن ا ستفاده می شود. این ذخیره سازی‌ها، امکان تامین انرژی از چند ساعت تا چند ماه را فراهم می‌کند که برای کاربردهای مدیریت انرژی از جمله آربیتراژ، پیک‌سایی، به تعویق انداختن گسترش شبکه، یا شیفت زمانی منابع تجدیدپذیر قابل استفاده است.

۵-۲- کاربرد ذخیره‌سازی سیار در شبکه برق

در میان تجهیزات ذخیره سازی مطرح شده فقط باتری‌ها هستند که امکان تامین هر دو کاربرد مطرح شده را دارا ست. بنابراین باتری‌ها به عنوان پیشرو فناوری در زمینه ذخیره‌سازی انرژی و تحقیقات بسیاری در دهه‌های گذشته بر انواع، کاربردها، مشخصات، بهینه‌سازی عملکرد در شبکه توزیع انجام شده ا ست. در میان این تحقیقات، تعداد زیادی از شرکت‌های برق در جهان باتری‌های با ظرفیت نیروگاهی ن صب کرده‌اند یا در حال گسترش هستند. سیستم‌های باتری دارای پتانسیل جابجایی در شبکه هستند چون دارای دانسیته توان و انرژی بالا و ساختار ماژولار هستند. همچنین توانایی اتصال سریع و راحت، عملکرد بی سر و صدا، و عدم نیاز به شرایط خاص نصب و ساخت، امکان جابجایی راحت در شبکه را فراهم می‌کند. در این حالت سی ستم ذخیره سازی باتری سیار می‌تواند در موقعیت‌ها و مکان مختلف شارژ و د شارژ شود. بر این ا ساس، باتری امکان شیفت انرژی ذخیره شده را به صورت زمانی و مکانی فراهم می‌کند. این انتقال انرژی زمانی-مکانی مزایای سیستم سیار را نسبت به سیستم ساکن افزایش می‌دهد. ایده استفاده از حالت سیستم ذخیره‌سازی باتری سیار برای اولین بار تو سط مو س سه تحقیقات توان برق (EPRI) در سال ۲۰۰۸ مطرح شد. در پروژه انجام شده ایده ا ستفاده از تجهیزات ذخیره سازی برای مدیریت رشد بار و کمک به عملکرد شبکه‌های توزیع مطرح شده است. تمرکز پروژه بر امکان استفاده از انواع مختلف باتری‌هاست. محققین مدلی بر پایه روش فراابتکاری (بهینه سازی ازدحام ذرات) برای حالت سی ستم ذخیره سازی باتری سیار ارائه داده‌اند. هدف اولیه ا ستفاده از سی ستم ذخیره سازی باتری سیار کاهش انتقال انرژی از شبکه بالاد ستی با حداکثر کردن ا ستفاده از منابع تجدیدپذیر در شبکه توزیع است[۱-۳].

مدیریت سهم بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع توان الکتریکی به دلیل تناوبی بودن به عنوان یک چالش از دیرباز مطرح

بوده است. یکی از روش‌های مواجهه با این مشکل استفاده از ادوات ذخیره سازی است. محققین مختلفی پیشنهاد داده‌اند تا از باتری‌های سیار برای این منظور استفاده شود. بر این اساس، حمل و نقل باتری‌های سیار چند–مرحله‌ای و روش برنامه‌ریزی لوجستیکی پیشنهاد شده است. این پیشنهادات برای افزایش ظرفیت انرژی‌های تجدیدپذیر و بهبود اقتصاد سیستم است. در این روش، باتری‌های سیار در محل انرژی‌های تجدیدپذیر شارژ شده و بوسیله خط ریلی به محل مصرف منتقل می‌شوند. در این تحقیق، روش برنامه‌ریزی ریاضی دومرحله‌ای ارائه شده است که به صورت همزمان سرمایه‌گذاری و عملکرد باتری‌های سیار را در شبکههای توزیع بهینه‌سازی می‌کنند. باتری سیار برای میکروگریدهای دینامیک در شرایط بحرانی سخت و افزایش تاب‌آوری شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. به صورت مشابه، هدف دیگر افزایش مقاومت شبکه توزیع با مدیریت منابع سیار بوده است. سیستم باتری سیار از نظر نصب مشابه سیستم‌های ثابت است و این موضوع وقتی سایز سیستم مورد توجه باشد، اهمیت پیدا می‌کند. معیارها به گونه‌ای اختصاص پیدا کرده است که برای خدمات مختلف از جمله تسطیح بار، پیک‌سایی، بهبود پروفیل ولتاژ و یکپارچه‌سازی انرژی تجدیدپذیر باشد. همچنین، نوسان بار و انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر تغییرات قیمت در بازار مورد توجه قرار می‌گیرد. در تحقیقی دیگر روش میکروگرید ریموت بر اساس گسترش استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری سیار مطرح شده است. از سوی دیگر تخمین اطمینان‌پذیری سیستم‌های ذخیره‌سازی سیار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین بررسی‌هایی برای مقایسه این روش با روش‌های رقیب از جمله استفاده از ظرفیت خودروهای برقی (EV) با برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار گرفته است[۳–۷]. مزایای سیستم‌های ذخیره‌سازی سیار در مقایسه با ناوگان EV در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است:

۱. عدم تمایل صاحب خودرو به کنترل شدن: معمولا، صاحبان EV علاقه‌ای ندارند که کنترل شوند و یا برنامه زمانبندی توسط نماینده‌ای به آنها اعلام شود. این موضوع باعث می شود صاحبان خودرو حس کنند که صاحب خودرو نیستند و به نظر آید که خودرو را قرض گرفته‌اند. این باعث کاهش استقبال جامعه از این سیستم کنترلی برای EV است که برای شبکه برق مشکل ایجاد می‌کند. در مورد سیستم‌های ذخیره‌سازی سیار این مشکل وجود ندارد.

۲. عدم شفافیت مالی و مکانیزم مشارکت: مکانیزم پرداخت و مشارکت شفافی وجود ندارد برای برنامه زمانبندی EV. حتی اگر صاحبان خودرو بخواهند مشارکت داشته باشند، باید مکانیزم مشخصی برای مشارکت و نحوه پرداخت تعیین شود. این مکانیزم باید مقدار توان و انرژی خریداری شده از خودرو و زمان و محل استفاده تعیین گردد. طراحی عملی و اجرای این مکانیزم یک چالش بحرانی است.

۳. عدم مشخص بودن سطح شارژ (SOC) EV: تخمین دقیق انرژی کل در دسترس از خودرو برقی بسیار پیچیده است. به دلیل اضمحلال باتری خودروهای برقی در طول زمان و تعداد خودرویی که در طرح شرکت خواهند کرد، انرژی و توان کل در دسترس به راحتی قابل تخمین نیست.

۴. پیچیدگی مدل و ردیابی: حتی اگر معضلات مطرح شده با استفاده از مدل‌های ریاضی قابل حل باشد، فرمولاسیون منتج از آن در

مقیاس بسیار بالا خواهد بود و حجم محاسبات بسیار بالایی خواهد داشت. این باعث مشکلات شدید در زمان کار و همگرایی اطلاعات خصوصا در شبکه توزیع در شرایط واقعی با تعداد اتوبوس‌های زیاد خواهد شد. برای هر خودرو بایستی برخی متغیرهای پیوسته و مرزی مورد توجه قرار گیرد که بتوان برنامه هر ساعت برای تامین توان و انرژی را تعیین کرد. در نتیجه با افزایش تعداد خودرو، ابعاد مشکل به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند.

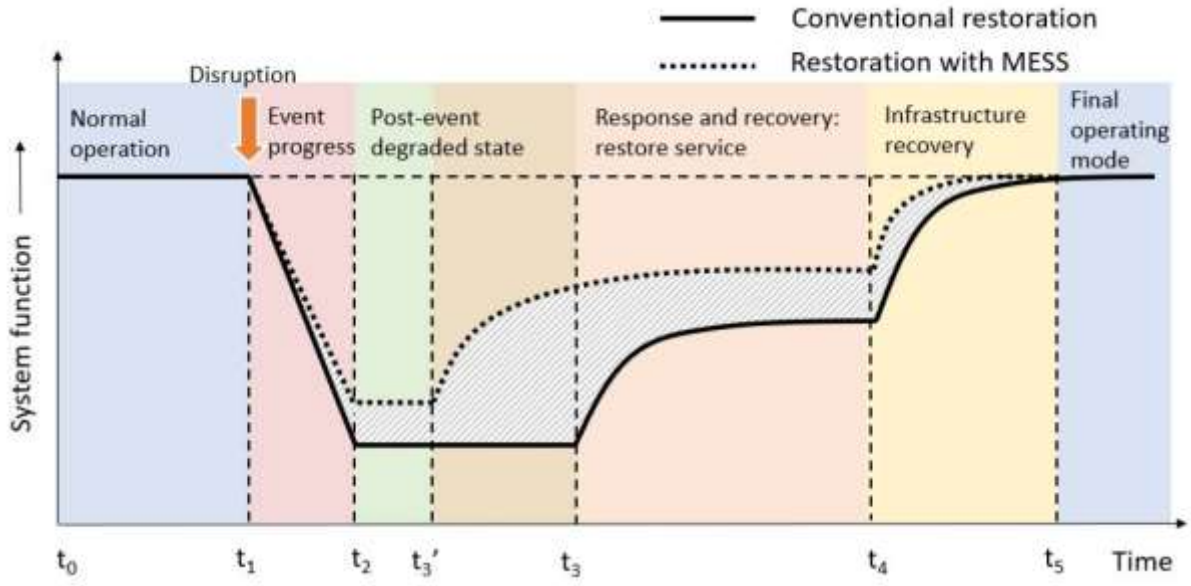
۵. اضمحلال باتری و هزینه‌های تحمیل شده به صاحب خودرو: استفاده از باتری خودروهای برقی برای کاربردهای مدیریت توان و انرژی در شبکه به صورت قابل ملاحظه‌ای طول عمر آن را ماهش می‌دهد. سلامت باتری به عنوان تابعی از تعداد شارژ و دشارژ و همچنین عمق دشارژ است. تعیین مقدار دقیق کاهش عمر باتری و هزینه تحمیل شده ناشی از استفاده در شبکه برق بسیار پیچیده است.

باید توجه کرد که الزامات اولیه برای استقرار یک مدل دقیق برای باتری‌های قابل حمل با توجه به رفتار زمانی–فضایی و بهینه‌سازی عملکرد بر اساس مدل بدست آید.

۵-۳- ذخیره‌سازی انرژی سیار برای افزایش تاب‌آوری

ذخیره سازی انرژی سیار تاب‌آوری سیستم توزیع را با تعدیل خاموشی ناشی از بلایای طبیعی و مشکلات شدید آب و هوایی را فراهم می‌کنند. این موضوع باعث کاهش زمان و تعداد مصرف‌کننده‌هایی که دچار قطعی برق می‌شوند، می‌گردد. ذخیره‌سازی انرژی سیار به صورت فیزیکی قابل جداسازی و اتصال به محلی با اولویت بالاتر هستند و امکان پاسخگویی برای شرایط اضطراری تامین برق به عنوان سیستم پشتیبان یا در حین بلایای طبیعی و ... را فراهم می‌سازد[۸]. سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار می‌تواند برای تشکیل میکروشبکه در یک یا چند تاسیسات با زیرساخت‌های مناسب اتصال، جهت کاهش میزان بار از دست رفته در حین خاموشی استفاده شود. این سیستم‌ها را می‌توان در مناطق آسیب‌پذیر از قبل مستقر کرد تا در زمان وقوع بحران برای قرار گرفتن در محل مناسب و کاهش مشکلات خاموشی از آن استفاده کرد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار امکان پاسخگویی سریع به نیازهای رو به رشد از جمله خاموشی، افزایش تاب‌آوری شبکه و انعطاف‌پذیری بیشتر در مقایسه با فناوری‌های ساکن را فراهم می‌سازد[۶]. علاوه بر تامین انرژی میکروشبکه، ذخیره‌سازی انرژی سیار می‌تواند برای انتقال انرژی از مکان‌هایی که منابع در دسترس است به مناطقی که دچار خاموشی شده‌اند نقش مهمی ایفا کند. سیستم‌های ذخیره سازی انرژی سیار را می‌توان از محل دارای مشکل به بیرون برده شده و شارژ گردد و برای تحویل انرژی مجدد به میکروشبکه برگردد. منابع در دسترس می‌تواند به عنوان یک منبع تغذیه نزدیک که همچنان به شبکه انتقال متصل است یا منبع تولید توان (از جمله مزرعه بادی یا خورشیدی مقیاس نیروگاهی) باشد. این توانایی برای استفاده از دارایی‌های استاندارد امکان جلوگیری تلفات اقتصادی ناشی از تولید بدون استفاده را فراهم آورد. البته اگر سیستم تولید یا تغذیه نزدیک در دسترس نباشد، سیستم‌های ذخیره سازی

انرژی سیار به عنوان منبعی محدود شناخته می شود و تنها می‌تواند توان پ شتیبان را تا زمانی که شارژ دارد فراهم کند. این ممکن ا ست باعث شود مصرف‌کنندگان توان را به محض تخلیه باتری از د ست دهند که باعث خاموشی کلی در زمان بحران خواهد شد. بنابراین بدون توان شارژ مجدد، سی ستم‌های ذخیره سازی انرژی سیار به عنوان راه‌حل‌های کوتاه‌مدت بجای راهکار بلندمدت مطرح می شوند. همچنین میزان شارژ باتری‌ها در هنگام خاموشی بسیار مشکل خواهد بود. اگر بلایای ناگهانی اتفاق بیافتد، ممکن است باتری‌ها کاملا شارژ نباشند و یا در شرایط بدتر د شارژ کامل با شند که باعث بلا استفاده شدن آن می شود. با توجه به نتایج تحقیقات [۳، ۵، ۹] شکل زیر ن شان‌دهنده مفهوم چگونگی بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیاراست. عملکرد سیستم با و بدون سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار در حین این رخداد مشخص شده است.



شکل ۵-۱- شماتیک بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار

برای یک سیستم توزیع، عملکرد سیستم در حالت نرمال مقدار بار تحویل شده در زمانیست که تمام نیاز تامین شده است. در حین خاموشی، بار با توجه به بحرانی بودن به زیرساخت‌های بحرانی تقسیم می‌شود. مدت منطبق بر این رویداد به مراحل مختلفی تقسیم می‌شود. این مراحل با حالت عملکرد نرمال شروع می‌شود وقتی برنامه‌ریزی و محاسبات پیشگیرانه مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار از قبل جایابی شده و شارژ شده برحسب نوع بلایا وارد مدار شود. برای رویدادهایی مانند طوفان، کولاک و حریق بزرگ، امکان پیش‌بینی و اطلاع یک روز قبل وجود دارد در حالیکه برای زمین‌لرزه و تورنادو در حد یک ساعت فرصت برای آماده‌سازی وجود دارد [۱۰-۱۲]. در اثر یک اختلال در زمان t_1، در هنگام آسیب به سیستم توزیع عملکرد تخریب شده و بار کاهش می‌یابد. در زمان t_2، سیستم به حالت تخریب بعد از واقعه می‌رسد که تمام آسیب‌ها اتفاق افتاده و هیچ باری هنوز بازگردانده نشده است. در واقعیت بازگشت سرویس ممکن است قبل از ایجاد آسیب اتفاق بیافتد به شکلی که بعد از زمان t_1، به صورت یکنوا کاهش نمی‌یابد. اگر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار، از قبل در محل‌هایی که امکان خاموشی دارند قرار گرفته است، عملکرد سیستم در حین حادثه و بعد از تخریب حاصل از حادثه شرایط بهبود می‌یابد. در پی حالت

تخریب، مرحله بازیابی و پاسخ شروع می‌شود و فعالیت بازیابی می‌شود. با کمک سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار، بازگشت به سرویس می‌تواند در زمانی که زیرساخت شبکه همچنان دچار مشکل است، اتفاق بیافتد. بازیابی زیرساخت در t_4 شروع می‌شود، که خطوط و تجهیزات آسیب‌دیده تعمیر شده است. در t_5 سیستم کاملا بازیابی شده و در شرایط عملکرد نهایی فعالیت می‌کند. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار عملکرد سیستم را در مقایسه با بازیابی معمول با تامین انرژی بارهایی که ممکن است خاموشی را تحربه کنند بهبود بخشیده که به صورت خط نقطه‌چین در شکل نشان داده شده است. به‌علاوه بازیابی سرویس زودتر آغاز می‌شود (که با t_0 نشان داده می‌شود) و شرایط نهایی عملکردی زودتر حاصل می‌شود. روی هم رفته پایداری شبکه با کاهش باز از دست رفته و بهبود عملکرد سیستم بهبود می‌یابد[۱۳–۱۵].

۵–۴– منابع انرژی سیار برای افزایش تاب‌آوری

تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی منابع انرژی سیار جهت بازیابی سرویس‌دهی به صورت از پیش جایابی شده یا جایابی لحظه‌ای، انجام شده است. اغلب منابع انرژی سیار با استراتژی‌های بازیابی سرویس‌دهی با استفاده از پیکربندی دوباره شبکه[۱] (NR) و تشکیل میکروشبکه‌های چندگانه (MGs)، تولید انرژی تجدیدپذیر پراکنده (DG) و/یا برنامه‌های پاسخ دیماند (DR) ادغام می‌شود[۱۶–۲۲]. جدول زیر کارهای انجام شده در زمینه افزایش تاب‌آوری منابع انرژی سیار شامل فرمولاسیون، هدف با در نظر گرفتن فناوری‌های منابع انرژی سیار و فناوری‌های اضافی که ایجاد هم‌افزایی کرده‌اند، را ارائه داده است.

جدول ۵–۱. تحقیقات انجام شده بر افزایش تاب‌آوری و اهداف مدنظر

نودهای سیستم تست	هماهنگ شده با	هدف	فرمولاسیون	EBs[۲]	MEGs[۳]	MEESs[۴]
۱۱۴	-	حداقل کردن زمان خاموشی	MIQP→MILP[۵]	–	۵	–

[1] Network reconfiguration

[2] Electric buses

[3] Mobile emergency generators

[4] Mobile energy storage systems

[5] Mixed integer linear program

۱۲۳	-	حداکثر کردن تاب‌آوری	MINLP[1]→MILP	۳	–	۲
۳۳	NR	حداقل کردن هزینه	MILP	–	–	۴
۱۵	MG	حداقل کردن هزینه	MISOCP[2]	–	–	۲ و ۳
۳۳و۱۲۳	NR,MG	حداکثر کردن بار بازیابی شده	MISOCP→MILP	۲	۱	۱
۶۸	MG	حداکثر کردن تاب‌آوری	MINLP→MILP	–	۵	–
۱۲۳	MG	حداقل کردن اتلاف بار بحرانی	MILP	–	۱۰	۰
۳۳ و ۱۲۳	NR	حداکثر کردن تاب‌آوری	MINLP→MILP	–	۲و۱	۲و۱
۳۳	NR, DG	حداقل کردن هزینه	MILP	–	–	۴
۱۳۲ و ۱۹۸	NR, DG	حداقل کردن هزینه	MILP	–	–	۳ و ۵
۳۳	NR	حداکثر کردن بازیابی بار	MINLP→MILP	۲	۱	۱
۱۲۳و ۸۵۰۰	DG, NR	حداکثر کردن بازیابی بار	MILP	–	۴	–
۳۳	DG, NR	حداکثر کردن بازیابی بار	MILP,MISDP[3]	۱	۱	۱
۱۲۳و۴۷	NR	حداقل کردن قطعی انرژی	MILP	–	۵	–
۳۳	NR, DG	حداکثر کردن بار تامین شده	MINLP→MILP	۱	۱	۱

[1] Mixed integer nonlinear program

[2] Mixed integer second order cone program

[3] Mixed integer semidefinite program.

۳میکرو شبکه	MG	حداقل کردن هزینه	MDP[1]	–	–	۴

محققین برنامه‌های چندمرحله‌ای توسعه داده‌اند برای منابع سیار انرژی از قبل جایابی شده و یا در لحظه جایابی شده مورد توجه قرار گرفته است. لی[2] و همکارانش [۲۳] یک برنامه بازیابی دومرحله‌ای پیشنهاد داده‌اند که در آن ژنراتورهای اضطراری سیار (MEGs) از قبل از حادثه جایابی شده‌اند و بلافاصله بعد از حادثه وارد مدار شده تا زمان خاموشی را برای بارهای بحرانی کاهش دهد. لی و همکارانش در تحقیقی دیگر با استفاده از همان چارچوب دومرحله‌ای، اتوبوس‌های برقی (EBs) و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار (MESSs) را نیز در نظر می‌گیرند[۲۱]. یائو[3] و همکارانش [۲۳ و ۲۵] چارچوب اتفاقی دومرحله‌ای را برای بازیابی سرویس‌دهی بعد از یک حادثه را با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار هماهنگ با تشکیل میکروشبکه چندتایی توسعه داده‌اند. آنها مشکل زمان‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار را با استفاده از شبکه فضا–زمان مدل‌سازی کرده‌اند و استراتژی بازیابی سرویس‌دهی را برای کاهش هزینه کل (شامل هزینه قطعی مصرف‌کننده، هزینه تولید میکروشبکه، هزینه جابجایی MESSs، و هزینه نگهداری باتری) بهینه‌سازی کرده‌اند. آنها در تحقیقی دیگر [۲۴]، نتایج تحقیقات قبلی را با استفاده از یک چارچوب بهینه‌سازی که مشکلات شبکه را به صورت دینامیک بروزرسانی کرده و اطلاعات را اصلاح می‌کند، گسترش داده‌اند. تحقیقات گسترده دیگری در زمینه استفاده از فرمولاسیون‌های مختلف با اهداف مشخص وجود دارد که جزو اهداف این پژوهش نیست که البته به صورت کلی به این اطلاعات اشاره شده است.

۵–۵– محدودیت‌های عملیاتی شبکه

با توجه به سیار بودن منبع تولید، اختصاص این منابع به مناطق مختلف بار داخل شبکه نیاز به حل مشکل دیسپچ انرژی بهینه دارد. این مدل‌ها قیود عملیاتی مرتبط به جریان توان اکتیو و راکتیو در سیستم، خروجی توان منبع انرژی سیار، و ولتاژهای نود را حل می‌کند. این‌ها به عنوان قیود ناهمگونی که مرزهای بالایی و / یا پایینی قابل قبول برای متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد، مدل شده‌اند.

مدل‌های جریان توان بهینه (OPF) معمول را می‌توان به نحوی اصلاح کرد که منابع انرژی قابل حمل را در برگیرند. در اینجا، هدف تخصیص منبع انرژی در دسترس در مسیری است که اهداف معین پروژه را که معمولترین آن هزینه عملکردی و میزان بار تحویل شده است، بهینه

1 Markov decision process

2 Lei

3 Yao

کند. کیم و ورکین[1] [۲۶] و ونگ[2] و همکارانش [۲۷] یک تخمین درجه دوم قابل ردیابی را برای مشکل جزیان توان بهینه مدل‌سازی کرده‌اند. از آنجایی که مشکل تخصیص منابع انرژی سیار معمولا با تاب‌آوری شبکه در برابر بلایای طبیعی آمیخته است، باید فرض کنیم که بخشی از شبکه توزیع ممکن است در دسترس نباشد. این بدان معنی است که پیکربندی دوباره شبکه و / یا میکروشبکه جزیره‌ای ممکن است لازم باشد که می‌تواند یک لایه پیچیدگی دیگر به مشکل دیسپچ انرژی اضافه می‌شود. دینگ[3] و همکارانش با استفاده از SOPs[4] در حین بازیابی سرویس‌دهی،به صورت مستمر جریان توان و ولتاژ را کنترل و تنظیم کردند. علاوه بر عدم توازن محدودیت‌ها، برخی از مواردی اشاره شده در بالا، مشکلات جریان توان بهینه شامل محدودیت‌هایی متوازن است که معادلات جریان توان را ارائه می‌دهد. در ساده‌ترین شکل، باید یک معادله تعادل توان شبکه–گسترده باشد تا پایداری فرکانس در سطح بالا را تضمین کند. البته مدل‌های واقع‌گرایانه‌تر جریان توان بهینه، هر دو توان اکتیو و راکتیو با استفاده از معادلات جریان توان متناوب را در بر می‌گیرد. این معادلات خطی نیستند که می‌تواند تاثیر منفی در سرعت پوشش‌دهی و ردیابی مشکلات بهینه‌سازی بگذارد. بدین منظور محققین زیادی از روش‌های خطی‌سازی برای معادلات جریان توان استفاده کرده‌اند. برای مثال معادلات تعادل توان واقعی و راکتیو در هر نود بر اساس مدل خطی شده DistFlow ارائه می‌شود [۲۵، ۲۸] بیشتر این مطالعات یک شبکه توزیع متعادل فرض شده است. اگرچه عملکرد متعادل برای شبکه‌های توزیع لزوما فرض درستی نیست، و به همین دلیل برخی دیگر از محققین تحقیقات را در شرایط واقعی‌تر شبکه مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۷–۲۹].

۵–۶– سیستم انتقال

استفاده از منابع انرژی سیار برای تاب‌آوری شبکه توزیع شامل دو مشکل جداگانه است: مشکل اختصاص منابع و مشکل مسیریابی. با اینکه برخی تحقیقات مشکل تخصیص منبع را با استفاده از منابع انرژی سیار برای کمک به بارهای ویژه حل کرده‌اند، سناریوهای واقعی شامل مشکل مسیریابی اضافی در شبکه حمل و نقل است. این باعث ایجاد محدودیت‌های اضافی می‌شود شامل زمان سفر، انسداد جاده و پتانسیل آسیب شبکه جاده‌ای. محققین هزینه انتقال را در تابع هدف ادغام کردند تا زمان سفر برای منبع انرژی سیار را به حداقل برساند[۲۵–۲۹]. از آنجایی که هزینه واحد کاهش پیدا می‌کند، مزیت منبع سیار انرژی به دلیل سهم آن، افزایش پیدا می‌کند. گائو[5] و همکارانش [۲۸] هزینه واحد انتقال را ثابت و ۰,۵ دلار به ازای مایل بر کیلووات ساعت برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار و ۱۰ دلار به ازای هر مایل برای

[1] Kim and Dvorkin

[2] Wang

[3] Ding

[4] Soft open point

[5] Gao

اتوبوس فرض کرده‌اند. یائو[1] و همکارنش هزینه انتقال را به صورت ثابت ۸۰ دلار به ازای هر جابجایی در نظر گرفته‌اند [۲۶] و از زمان و مسافت سفر که پارامترهای مهمی هم هستند صرف نظر کرده‌اند. در تحقیقی دیگر [۲۹] هزینه واحد انتقال را ۸۰ دلار به ازای هر ساعت در نظر گرفته است که فقط بر اساس زمان سفر است. محاسبه هزینه انتقال کمک‌کننده است وقتی که هدف فرموله شده برای به حداقل رساندن هزینه عملکرد باشد ولی پارامترهای عدم قطعیت زمان سفرکه از آسیب یا انسداد در جاده بوجود می‌آید را نمی‌توان در سناریوهای واقعی مدنظر قرار نداد. تحقیقات متعددی از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر Dijkstra برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر از محل قرار گرفتن منبع انرژی سیار به محل بازیابی استفاده می‌کنند که مسیر بهینه منبع انرژی سیار تعیین شود. مسیر کوتاه‌تر با زمان سفر کوتاه‌تر مطابقت دارد که امکان تحویل بار توسط منابع انرژی سیار برای مدت زمان طولانی‌تر فراهم شده و در نتیجه تاب‌آوری سیستم افزایش می‌یابد. لی[2] و همکارانش [۲۶] از الگوریتم کوتاه‌ترین مسیر Dijkstra برای تعیین زمان سفر برای هر ژنراتور انرژی سیار استفاده کردند ولی امکان آسیب‌های احتمالی و انسداد جاده‌ای را در جایابی در شبکه واقعی در نظر نگرفته‌اند. کاووسی فرد و همکارانش [۲۹] از الگوریتم Dijkstra برای تهیه کوتاه‌ترین مسیر برای مسیریابی منبع انرژی سیار بدون با نظر گرفتن آسیب‌های احتمالی جاده، استفاده کرده‌اند. با افزایش آسیب جاده‌ای،، زمان سفر منبع انرژی سیار نیز افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، زمان سفر منبع انرژی سیار به عنوان متغیر رندوم بوسیله چارچوب اتفاقی بر پایه استحاله خنثی مدل شده است که می‌تواند عدم قطعیت بالا را با محاسبات کمتر در مقایسه با شبیه‌سازی مونت کارلو را مدل کند.

یائو و همکارانش [۲۵] مدل شبکه زمان–فضا را برای ارائه سفرهای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی شامل جابجایی، بدون در نظر گرفتن معضلات و انسداد ناشی از جریان ترافیک، استفاده کرده‌اند. در تحقیقی دیگر شبکه‌ای مشابه برای مدل‌سازی رفتار سفر منابع انرژی سیار ارائه شده است.

انسداد مسیر در تحقیقات اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. سو و همکارانش[3] جریان ترافیک دینامیک را درسیستم حمل و نقل مدنظر قرار می‌دهد تا تصمیم‌گیری برای مسیریابی سیستم توان سیار را اطلاع دهد. طاهری و همکارانش [۳۰] زمان سفر را با استفاده از نقشه گوگل استخراج می‌کند و حساسیت فرایند بازیابی به انسدادهای ترافیکی با استفاده از فاکتور انسداد ترافیک مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان داده است این روش امکان ارائه نسبتی برای زمان سفر در شرایط اضطراری و شرایط نرمال را فراهم می‌کند.

فرصت‌ها و چالش‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار

[1] Yao

[2] Lei

[3] Xu

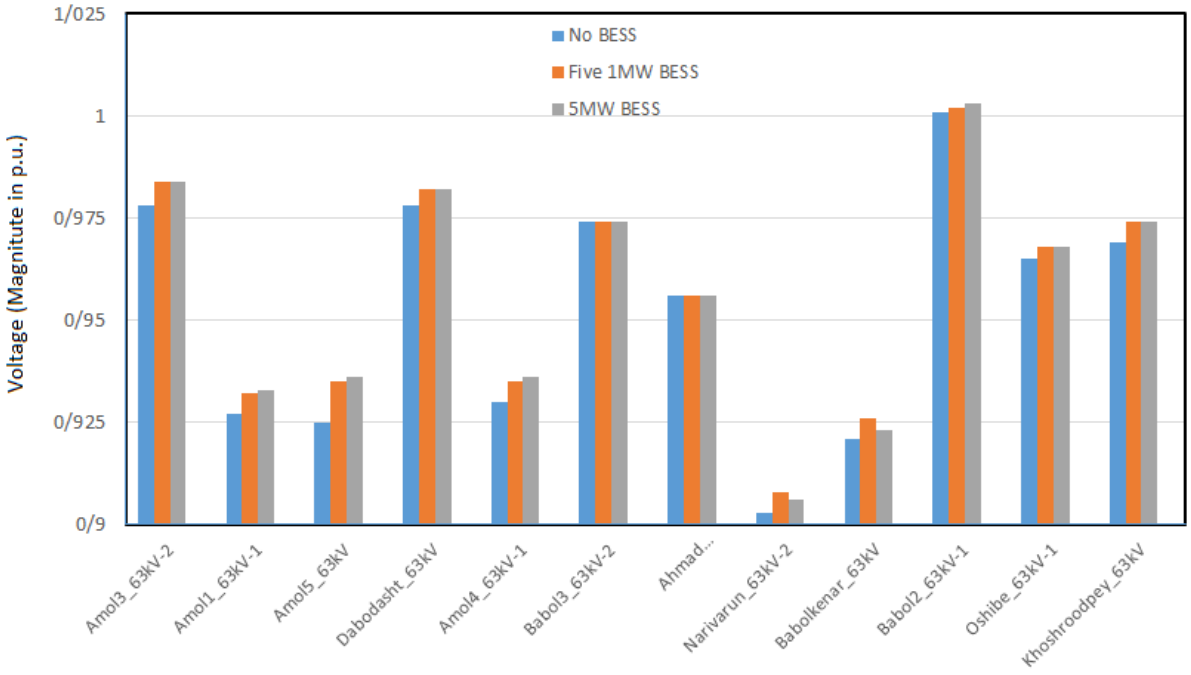
چالش اولیه وقتی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار برای بازیابی سرویس مورد استفاده قرار می‌گیرد این است که آنها منابع انرژی فانی هستند اگر شارژ نشوند. بنابراین، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار ممکن است به عنوان راه‌حل کوتاه–مدت برای مشکلات بلند–مدت در حالت آسیب‌های زیرساختی گسترده باشند. محققین الگوهای شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار ترکیب شده با میکروشبکه‌ها را در تحقیقات خاصی در نظر گرفته‌اند، ولی این تحقیقات باید گسترش داده شوند تا امکان تخمین نیازهای اضافی در زمان خاموشی غیرمنتظره فراهم گردد. متناوبا، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار می‌تواند با یک منبع تولید تجدیدپذیر ادغام شود برای مثال پانل‌های فتوولتائیک یا میکروتوربین‌های بادی برای امکان شارژ در محل ایجاد شود. در حالتی دیگر، ظرفیت یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار ممکن است ظرفیت سیستم برای پاسخگویی توان کل منطقه خاموشی کفایت نکند. در این حالت، استقرار سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار باید با کاهش دیماند یا بار همانگونه که در تحقیقات اشاره شده، هماهنگ شود.

تحقیقات بیشتری برای بررسی چگونگی اجرای کاهش بار برای مصرف‌کنندگان خانگی، بارهای غیرقابل کنترل یا چگونگی تعمیم برنامه برای کاهش توان مصرفی هنگامیکه توان مصرف‌کننده توسط یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار بازیابی شد، باید انجام شود. متناوبا، محل بار ممکن است به چندین میکروشبکه تقسیم شود تا ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار بتواند تمامی مناطق کوچکتر را تامین کند. با مطالعه کامل استقرار سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار و تشکیل میکروشبکه‌ها، مشکل جایابی سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار می‌تواند با سوئیچینگ سیار و تجهیزات جدایش برای پیاده‌سازی پیکربندی مجدد و استراتژی‌های تطبیقی میکروشبکه بر سیستم با نقاط جدایش فیکس شده، ترکیب شود.

۵–۷– بهبود پروفیل ولتاژ و پیک‌سایی در شبکه فوق توزیع

برای بررسی تاثیر استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی باتری‌های لیتیومی با توجه به خروجی فصول قبل در شبکه برق مازندران تاثیر افزودن ۵ مگاوات باتری لیتیومی به دو صورت یک سیستم ۵ مگاواتی و ۵ سیستم ۱ مگاواتی با استفاده از شبیه‌سازی بررسی شد که در ادامه ارائه شده است. بدین منظور ذخیره‌ساز ۵ مگاواتی در باس ۲۰ کیلوولت آمل ۵ فرض شد و ذخیره سازهای ۱ مگاواتی در باس های ناریوران، آمل ۱، آمل ۴، آمل ۵ و بابل کنار فرض شده‌اند. لازم بذکر است انتخاب باس‌ها با توجه به شرایط خط انتخاب شده است که البته هم سایز و هم مکان این ذخیره‌سازها قابل بهینه‌سازی است که نیازمند مطالعه‌ای جداگانه و بررسی شبکه‌های مختلف برق کشور برای پیدا کردن نقطه بهینه است. این بررسی فقط برای بررسی تاثیر استفاده از سیستم ذخیره‌سازی در کاهش تلفات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این شبیه‌سازی بر ولتاژ در شکل ۵–۲ و جدول ۵–۲ ارائه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167



شکل ۵-۲- مقایسه تاثیر کاربرد ذخیره‌ساز باتری بر ولتاژ شبکه

جدول ۵-۲. اثر کاربرد ذخیره‌ساز باتری بر ولتاژ شبکه

نام پست	ولتاژ (پریونیت) وضعیت موجود	ولتاژ (پریونیت) نصب ذخیره ساز ۵ مگاوات در باس ۲۰ کیلوولت آمل ۵	ولتاژ (پریونیت) نصب ۵ واحد ذخیره ساز ۱ مگاوات در ۵ باس
خوشرودپی	۰,۹۶۹	۰,۹۷۴	۰,۹۷۴
اشیب	۰,۹۶۵	۰,۹۶۸	۰,۹۶۸
ناریوران	۰,۹۰۳	۰,۹۰۶	۰,۹۰۸
آمل ۱	۰,۹۲۷	۰,۹۳۳	۰,۹۳۲
آمل ۴	۰,۹۳۰	۰,۹۳۶	۰,۹۳۵
آمل ۵	۰,۹۲۵	۰,۹۳۲	۰,۹۳۰
آمل ۳	۰,۹۷۹	۰,۹۸۴	۰,۹۸۴
دابودشت	۰,۹۷۸	۰,۹۸۲	۰,۹۸۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

بابل کنار	۰,۹۲۱	۰,۹۲۳	۰,۹۲۶
بابل ۲	۱,۰۰۱	۱,۰۰۳	۱,۰۰۲
بابل ۳	۰,۹۷۴	۰,۹۷۴	۰,۹۷۴
احمد چال پی	۰,۹۵۶	۰,۹۵۶	۰,۹۵۶

همانگونه که مشاهده می‌شود ولتاژ در اکثر پست‌ها با افزایش رویرو شده است که این مقدار در سناریوهای مختلف ۱ سیستم ۵ مگاواتی و پنج سیستم ۱ مگاواتی متغییر است. برای درک بهتر تاثیر این سناریوها به بررسی کلی تاثیر این سیستم‌های ذخیره‌سازی بر خروجی شبکه و تغییرات اتلاف پرداختیم که در ادامه ارائه شده است.

جدول ۵-۳- تاثیر استفاده از ذخیره‌ساز بر روی توان اکتیو، راکتیو و تلفات شبکه

		Generation AP MW	Generation RP Mvar	Load P (U) MW	Load Q (U) Mvar	Losses MW	Losses (RP) Mvar	Losses saved MW
	Summary Grid	3413/141	2037/021	4756/63	1453/726	268/0376	1831.576	1/6479
5MW	Mazandaran	3124/751	1981/841	6/2	-0/1	132/3425	1143.268	0/7175
	Grid RDC	288/39	55/18028	4750/43	1453/826	135/6952	688.3078	0/9303
	Summary Grid	3412/955	2035/839	4756/63	1453/726	267/8516	1829/554	1/8339
5*1MW	Mazandaran	3123/565	1980/516	6/2	-0/1	132/2834	1141/659	0/7766
	Grid RDC	289/39	55/32277	4750/43	1453/826	135/5682	687/8957	1/0573
	Summary Grid	3414/789	2046/988	4756/63	1453/726	269/6855	1848/804	0
No BESS	Mazandaran	3131/399	1992/52	6/2	-0/1	133/06	1155/965	0
	Grid RDC	283/39	54/46782	4750/43	1453/826	136/6255	692/8386	0

همانگونه که ملاحظه می‌شود استفاده از سیستم ذخیره‌سازی به صورت کاملا موثری باعث بهبود پارامترهای تولید توان شبکه شده است و تلفات را کاهش می‌دهد. استفاده از ۵ سیستم ۱ مگاواتی تاثیر بیشتری در کاهش تلفات در مقایسه با ۱ سیستم ۵ مگاواتی دارد. با فرض هزینه پرداختی توانیر معادل ۱۰۰ میلیارد تومان (در حدود ۳,۲ میلیون دلار) برای ۱ مگاوات تلفات و هزینه ۸ میلیون دلاری ۵ مگاوات باتری، بازگشت سرمایه استفاده از باتری در شبکه ۱,۵ سال است و با توجه به عمر سیکلی آن بیش از ۱۰ میلیون دلار امکان صرفه‌جویی فراهم می‌شود. نکته قابل توجه دیگر تاثیر بیشتر استفاده از ۵ سیستم ۱ مگاواتی بجای یک سیستم ۵ مگاواتی است که اهمیت شبکه‌های سیار را بیش از پیش نشان می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.167

۵-۸- نتیجه‌گیری

در مواجهه با بلایای طبیعی به جهت تغییرات آب و هوایی، تاب‌آوری شبکه برق، بحث سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار در کشورهای مختلف اهمیت ویژه‌ای یافته است. این سیستم‌ها شبکه برق با تاب‌آوری بالاترو با امکان بازیابی و تحمل بلایا، و کاهش هزینه اقتصادی و اجتماعی ناشی از خاموشی را فراهم می‌سازد. منابع انرژی سیار، خصوصا سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار، تاب‌آوری شبکه برق را با بازیابی توان به بار بحرانی بعد از یک پیشامد احتمالی را افزایش می‌دهد. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار همچنین می‌تواند سرویس‌های کمکی را در شرایط نرمال را فراهم کند. با کاهش هزینه باتری‌ها، استقرار تجاری سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار در حال افزایش است. نکته قابل توجه این است که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار مبتنی بر باتری پتانسیل بالایی را برای این کاربرد دارد. علاوه بر این، استفاده از این سیستم‌ها برای پیک‌سایی، تسطیح بار، تعدیل ولتاژ و در زمان‌های پیک مصرف کاربرد دارد. همچنین استفاده از این سیستم‌ها برای انتقال انرژی نیروگاه‌های تجدیدپذیر به سایر محل‌های مصرف در زمان پیک مطرح است. بررسی‌ها نشان می‌دهد با توجه به معضلات موجود خصوصا در زمینه برنامه‌ریزی شارژ، امکان استفاده از این پتانسیل با خودروهای برقی فراهم نیست. البته در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی سیار، ژنراتورهای انرژی سیار، و اتوبوس‌های برقی نیز محدودیت‌های انتقال وجود دارد. در مورد سرمایه‌گذاری، همانگونه که مطرح شد باتری‌های لیتیومی بهترین گزینه فعلی برای استفاده در سیستم‌های ذخیره‌سازی سیار است. با توجه به شرایط شبکه توزیع، ظرفیت سیستم ذخیره‌سازی می‌تواند از ۱۰۰ کیلووات تا چند مگاوات متغیر باشد. هزینه ذخیره‌سازی باتری‌های لیتیومی محاسبه شده در فصل گذشته ۰,۱۲۵ دلار به ازای کیلووات ساعت است. برای پشتیبانی تصمیمات سرمایه‌گذاری سیستم ذخیره‌سازی انرژی سیار باید هزینه قطعی برق مصرف‌کنندگان، هزینه سربار بدلیل مصرف پیک و همچنین نیاز به تاسیس نیروگاه‌های جدید مدل شود تا مشخص شود در بلند-مدت این هزینه‌ها چگونه تغییر می‌کند.

در ایران نیز استفاده از این سیستم‌ها به صورت سیار با توجه به اتلافات موجود شبکه در کشور پتانسیل بالایی دارد. خصوصا با توجه به وجود پیک بار در تابستان و امکان پیش‌بینی بار حداکثر، امکان استفاده از این سیستم‌ها و کاهش هزینه تاسیس نیروگاه جدید و نصب سیستم ذخیره‌سازی ثابت را می‌تواند کاهش دهد یا حداقل این سرمایه‌گذاری را به تعویق انداخته و با استفاده از نیروگاه‌های خورشیدی و بادی آن را جبران کرد. در نهایت با بررسی شبکه مازندران و استفاده از ۵ مگاوات باتری لیتیومی در شبکه، بهبود کاملا مشهودی در ولتاژ مشاهده شد و همچنین تلفات شبکه کاهش پیدا کرد. این کاهش تلفات، استفاده از این سیستم‌ها را در شبکه برق کشور حتی با قیمت‌های فعلی امکان‌پذیر می‌کند. بررسی‌ها نشان داد کاهش تلفات در سناریوی استفاده از ۵ سیستم ۱ مگاواتی بیشتر از ۱ سیستم ۵ مگاواتی است که اهمیت سیستم‌های سیار را بیش از پیش نشان می‌دهد.

۵-۱- مراجع

[1] Y. Su, Smart energy for smart built environment: a review for combined objectives of affordable sustainable green, Sustain. Cities Soc. 53 (2019), 101954.

[2] N. Shaukat, et al., A survey on consumers empowerment, communication technologies, and renewable generation penetration within smart grid, Renew. Sustain. Energy Rev. 81 (2018) 1453–1475.

[3] L. Tronchin, M. Manfren, B. Nastasi, Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies–a critical analysis of possible paths of integration in the built environment, Renew. Sustain. Energy Rev. 95 (2018) 341–353.

[4] C. Mejia, Y. Kajikawa, Emerging topics in energy storage based on a large-scale analysis of academic articles and patents, Appl. Energy 263 (2020), 114625.

[5] H. Mehrjerdi, Simultaneous load leveling and voltage profile improvement in distribution networks by optimal battery storage planning, Energy 181 (2019) 916–926.

[6] R. Hemmati, H. Saboori, Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications–a review, Renew. Sustain. Energy Rev. 65 (2016) 11–23.

[7] MT. Lawder, et al., Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications, Proc. IEEE 102 (6) (2014) 1014–1030.

[8] H. Hesse, et al., Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids, Energies 10 (12) (2017) 2107.

[9] H.H. Abdeltawab, Y.-R. Mohamed, Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems, IEEE Trans. Indust. Electron. 64 (9) (2017) 6828–6840.

[10] J. Yan, F. Lai, Y. Liu, C.Y. David, W. Yi, J. Yan, Multi-stage transport and logistic optimization for the mobilized and distributed battery, Energy Convers. Manage. 196 (2019) 261–276.

[11] J. Kim, Y. Dvorkin, Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids, IEEE Trans. Smart Grid 10 (5) (2018) 4996–5006.

[12] L. Che, M. Shahidehpour, Adaptive formation of microgrids with mobile emergency resources for critical service restoration in extreme conditions, IEEE Trans. Power Syst. 34 (1) (2018) 742–753.

[13] H. Abdeltawab, Y. Abdel-Rady, I. Mohamed, Mobile energy storage sizing and allocation for multi-services in power distribution systems, IEEE Access 7 (2019) 176613–176623.

[14] Y. Song, et al., Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage, IEEE Access 7 (2019) 95248–95263.

[15] Y. Chen, et al., Reliability evaluation of distribution systems with mobile energy storage systems, IET Renew. Power Gen. 10 (10) (2016) 1562–1569.

[16] P.M. de Quevedo, et al., Reliability assessment of microgrids with local and mobile generation, time-dependent profiles, and intraday reconfiguration, IEEE Trans. Ind. Appl. 54 (1) (2017) 61–72.

[17] H. Saboori, S. Jadid, M. Savaghebi, Optimal management of mobile battery energy storage as a self-driving, self-powered and movable charging station to promote electric vehicle adoption, Energies 14 (3) (2021) 736.

[18] H. Saboori, S. Jadid, Optimal scheduling of mobile utility-scale battery energy storage systems in electric power distribution networks, J. Energy Storage 31 (2020), 101615.

[19] A. Naderipour, et al., Sustainable and reliable hybrid AC/DC microgrid planning considering technology choice of equipment, Sustain. Energy Grids Netw. 23 (2020), 100386.

[20] S. Dehghan, N. Amjady, Robust transmission and energy storage expansion planning in wind farm-integrated power systems considering transmission switching, IEEE Trans. Sustain. Energy 7 (2) (2015) 765–774.

[21] H. Karimi, S. Jadid, H. Saboori, Multi-objective bi-level optimisation to design real-time pricing for demand response programs in retail markets, IET Gen. Transm. Distrib. 13 (8) (2019) 1287–1296.

[22] Z. Yang, H. Zhong, A. Bose, T. Zheng, Q. Xia, C. Kang, A linearized OPF model with reactive power and voltage magnitude: a pathway to improve the MW-only DC OPF, IEEE Trans. Power Syst. 33 (2018) 1734–1745.

[23] Lei, S.; Wang, J.; Chen, C.; Hou, Y. Mobile Emergency Generator Pre-Positioning and Real-Time Allocation for Resilient Responseto Natural Disasters. IEEE Trans. Smart Grid **2018**, 9, 2030–2041.

[24] Yao, S.; Zhao, T.; Zhang, H.; Wang, P.; Goel, L. Two-stage Stochastic Scheduling of Transportable Energy Storage Systems for Resilient Distribution Systems. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Boise, ID, USA, 24–28 June 2018; pp. 1–6.

[25] Yao, S.; Wang, P.; Liu, X.; Zhang, H.; Zhao, T. Rolling Optimization of Mobile Energy Storage Fleets for Resilient Service Restoration. IEEE Trans. Smart Grid **2020**, 11, 1030–1043.

[26] Kim, J.; Dvorkin, Y. Enhancing Distribution System ResilienceWith Mobile Energy Storage and Microgrids. IEEE Trans. Smart Grid **2019**, 10, 4996–5006.

[27] Wang, W.; Xiong, X.; Xiao, C.; Li, H.; Zhang, B. Integration of Mobile Energy Resources and Demand Response to Strengthen the Survivability of Isolated Distribution Systems. In Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2),Wuhan, China 30 October–1 November 2020; pp. 1571–1577.

[28] Gao, H.; Chen, Y.; Mei, S.; Huang, S.; Xu, Y. Resilience-Oriented Pre-Hurricane Resource Allocation in Distribution Systems Considering Electric Buses. Proc. IEEE **2017**, 105, 1214–1233.

[29] Kavousi-Fard, A.;Wang, M.; Su,W. Stochastic Resilient Post-Hurricane Power System Recovery Based on Mobile Emergency Resources and Reconfigurable Networked Microgrids. IEEE Access **2018**, 6, 72311–72326.

[۳۰]Taheri, B.; Safdarian, A.; Moeini-Aghtaie, M.; Lehtonen, M. Distribution System Resilience Enhancement via Mobile Emergency Generators. IEEE Trans. Power Deliv. **2021**, 36, 2308–2319.